

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2011**

**Jakub Kvapil**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra měřicí a řídicí techniky**

**Monitorovací systém hybridního  
napájecího systému na bázi cRIO**

**Monitoring System for Hybrid Power  
Supply Based on cRIO**

**2011**

**Jakub Kvapil**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Kvapil**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Monitorovací systém hybridního napájecího systému na bázi cRIO**  
**Monitoring System for Hybrid Power Supply Based on cRIO**

Zásady pro vypracování:

Hybridní napájecí systém sestává z několika zdrojů elektrické energie a systému pro akumulaci energie. Za reálného provozu je pro další výzkum nutné znát toky výkonů z jednotlivých zdrojů k zátěži či k akumulátoru energie a směrem k zátěži. Nasazení hybridního napájecího systému se předpokládá v místech mimo běžnou distribuční síť. Naměřená data se zaznamenávají lokálně, ale také se pro dohled nad systémem zasílají do datové centrály. Předpokládá se realizace v laboratoři a následné nasazení na reálném hybridním napájecím systému.

1. Seznámení se s problematikou návrhu a implementace aplikace na platformě cRIO firmy National Instruments v grafickém programovacím prostředí LabVIEW.
2. Seznámení se s problematikou měření elektrických výkonů a datovými přenosy.
3. Rozbor funkce hybridního napájecího systému FVE+VTE.
4. Návrh a vývoj SW aplikace pro monitor na hardware cRIO a pro prohlídku naměřených dat.
5. Ověření funkčnosti aplikace a zhodnocení použité technologie.
6. Nedílnou součástí odevzdání diplomové práce je 3-4 stránkové shrnutí realizované problematiky (rozšířený abstrakt) v angličtině.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. *LabVIEW Fundamentals*. Austin: National Instruments, 2007. 165 s.
2. Firemní dokumentace NI Developer Zone.
3. Firemní dokumentace NI - LabVIEW FPGA - Functions and Example (IP Cores and FPGA Examples).

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

---

doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.  
vedoucí katedry

---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

6.5.2011

Podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Bilíkovi Ph.D. za vynikající vedení, pomoc a obětavost v průběhu celého vypracovávání práce. Jeho profesionální vedení mi bude inspirací v dalším profesním životě. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Stanislavu Mišákovi Ph.D. za možnost zpracování této zajímavé práce. Mé díky patří také pánům Ing. Petru Kačorovi Ph.D. a Ing. Lukáši Prokopovi Ph.D. za pomoc a obětavost při řešení problémů na rozhraní monitorovacího systému a systému hybridního napájení. A samozřejmě nesmím zapomenout na zaměstnance a firmu Elcom a.s., kde mi bylo umožněno využít profesionálního vybavení při kalibraci monitorovacího systému.

## **Abstrakt**

Monitorovací systém slouží k měření a vizualizaci výkonových parametrů v systému hybridního napájení, který byl postaven na půdě VŠB-TU Ostrava. Takto lze získat přehled o účinnosti celého hybridního napájecího systému. Monitorovací systém se skládá ze tří částí: části měření, zpracování a ukládání dat, části vizualizace a samostatného napájecího zdroje. Hlavní částí celého systému je první jmenovaná. Tato je tvořena převodníky napětí a proudů firmy LEM a měřicího systému NI compactRIO. Převodníky LEM slouží ke galvanickému oddělení měřeného obvodu od měřicí části a zároveň k přizpůsobení velikosti měřených veličin. NI cRIO zabezpečuje samotné měření, zpracování a ukládání dat. Data jsou z měřicího systému cRIO bezdrátově přenášena do vzdáleného počítače, kde dochází k jejich zálohování a vizualizaci. Vizualizace je dostupná na internetu a kdokoli se může podívat na provozní stavy hybridního napájecího systému. Při realizaci monitorovacího systému byla jeho funkčnost ověřena dlouhodobým testováním a přesnost měření byla zkalibrována na cejchovaném kalibrátoru. Nyní je monitorovací systém nasazen v plném provozu.

## **Klíčová slova**

Monitorovací systém, Hybridní napájecí systém, National Instruments, compactRIO, cRIO, FPGA, LabVIEW, LEM, převodník, AA filtr, Anti-Aliasing filtr, DC/DC měnič

## **Abstract**

Monitoring system is intended for measuring and visualization of power parameters in hybrid power supply system built on VSB-TUO university campus. That's how we can obtain complete overview about hybrid power supply system efficiency. Monitoring system consists of three main parts: data acquisition, data visualization and an independent power supply. The main part of whole system is the first mentioned. It contains voltage and current transducers LEM and reconfigurable embedded acquisition system NI compactRIO. LEM transducers are used to galvanically isolate measured and measuring circuits and also to scale measured values. NI cRIO performs data acquisition, data manipulation and data saving. Data files are transferred from cRIO to remote computer, where is backup data storage and data visualization performed. Data visualization is available through internet web site. Monitoring system functionality was verified by long time testing and measurement accuracy was calibrated with precise calibrator. Nowadays the monitoring system is in full service.

## **Keywords**

Monitoring system, Hybrid power supply system, National Instruments, compactRIO, cRIO, FPGA, LabVIEW, LEM, transducer, AA filter, Anti-Aliasing filter, DC/DC converter

## Seznam použitých symbolů a zkratek

AA filtr – Anti-Aliasing filtr

CSV (Comma-separated values, hodnoty oddělené čárkami) je jednoduchý souborový formát určený pro výměnu tabulkových dat. Soubor ve formátu CSV sestává z řádků, ve kterých jsou jednotlivé položky odděleny znakem čárka (.). [1]

FIFO – first in first out (z ang. první dovnitř první ven). Druh vyrovnávací paměti, kdy prvně do paměti přichází data také jako první paměť při jejím čtení opouští.

$f_s$  – vzorkovací frekvence (angl. sampling rate)

NaOH – chemické značka hydroxidu sodného

VŠB-TUO – Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

WiFi AP – WiFi Access Point (z angl. přístupový bod do WiFi sítě)

## Obsah

Úvod .....	8
1 Hybridní napájecí systém na VŠB-TU Ostrava .....	9
1.1 První sloup .....	10
1.1.1 Větrná elektrárna VT1 .....	10
1.1.2 Fotovoltaická elektrárna FV1 .....	10
1.1.3 Veřejné osvětlení VO1 .....	10
1.2 Druhý sloup .....	11
1.2.1 Větrná elektrárna VT2 .....	11
1.2.2 Fotovoltaická elektrárna FV2 .....	11
1.2.3 Veřejné osvětlení VO2 .....	11
1.3 Rozvaděč .....	11
1.3.1 Baterie .....	11
1.4 Zapojení celého systému .....	11
2 Základní návrh monitorovacího systému .....	13
2.1 Požadavky na monitorovací systém .....	13
2.2 Analýza požadavků .....	14
2.2.1 Popis měřených veličin .....	14
2.2.2 Rozbor problematiky výpočtu výkonů .....	15
2.2.3 Problematika umístění monitorovacího systému .....	16
2.2.4 Napájení monitorovacího systému .....	16
2.2.5 Komunikační propojení měřicí části a vzdáleného PC .....	16
2.3 Volba komponent monitorovacího systému .....	17
2.3.1 Měřicí část .....	17
2.3.2 Napájení měřicí části .....	18
2.3.3 Komunikace měřicí části se vzdáleným počítačem .....	19
2.3.4 Vzdálený počítač .....	20
3 Výroba elektroniky monitorovacího systému .....	21
3.1 Napájecí část .....	21
3.2 Měřicí část .....	23
3.3 Samotná výroba desek plošných spojů a sestavení elektroniky .....	29
3.3.1 Oživení elektroniky .....	29

3.3.2	Umístění a zapojení elektroniky na panely rozvaděče .....	31
3.4	Měření charakteristik a kalibrace elektroniky .....	31
3.4.1	Frekvenční charakteristiky .....	31
3.4.2	Přesnost měření a kalibrace .....	33
4	Programová část monitorovacího systému .....	37
4.1	Měření a ukládání dat na systému cRIO.....	37
4.1.1	Program pro FPGA obvod.....	38
4.1.2	Program pro cRIO kontrolér.....	40
4.2	Zálohování a vizualizace dat na vzdáleném počítači.....	42
5	Hodnocení funkčnosti monitorovacího systému .....	44
5.1	Naměřené výsledky .....	45
6	Závěr.....	46
7	Použitá literatura.....	47
8	Seznam příloh	



## Úvod

Na VŠB-TU Ostrava byl vytvořen hybridní napájecí systém sestávající ze dvou větrných a dvou fotovoltaických elektráren, dvou lamp veřejného osvětlení a akumulátorové baterie pro uchování získané energie. Smyslem tohoto systému je posouzení vlastností různých zdrojů obnovitelné energie a jejich vhodnosti pro použití jako primárního zdroje elektrické energie v místech bez napojení na energetickou rozvodnou síť. Hlavním přínosem hybridního napájecího systému je kombinace různých zdrojů energie, které se mohou navzájem doplňovat. V tomto případě je použita kombinace větrné a sluneční elektrárny, kdy větrná elektrárna dodává energii během špatného počasí (větrné dny, zimní období) a sluneční naopak při jasných letních dnech, kdy je nedostatek větrného proudění.

Pro sledování vlastností hybridního napájecího systému bylo nutné vytvořit monitorovací systém, který by měl měřit výkonové parametry všech částí systému a zároveň by měl naměřené hodnoty poskytovat k další analýze. Návrh a sestavení takového systému je náplní této diplomové práce. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé části realizace monitorovacího systému.

První kapitola diplomové práce popíše celý systém hybridního napájení. Poskytne informace o jednotlivých zdrojích, spotřebičích a všech elektronických zařízeních v obvodu hybridního systému. Také zde budou popsány jednotlivé elektrické parametry všech částí systému.

Další kapitola již bude pojednávat o monitorovacím systému, jeho návrhu a realizaci. Provede se zde rozbor toho, co a jak měřit. Základní částí systému bude měřicí systém na WH platformě cRIO společnosti National Instruments. K němu je nutné vhodně zvolit a navrhnout vstupně/výstupní moduly, převodníky měřených veličin a další hardware pro zajištění průběhu měření (anti-aliasing filtry, baterie pro napájení monitorovacího systému, atd.). Realizaci této elektroniky řeší následující podkapitola. Součástí monitorovacího systému jsou také programy pro zajištění měření na systému cRIO i pro následnou vizualizaci a zpracování naměřených dat.

# 1 Hybridní napájecí systém na VŠB-TU Ostrava

V současné době jsou stále více populární tzv. hybridní obnovitelné zdroje elektrické energie. Ve většině případů se jedná o paralelní spolupráci větrné a fotovoltaické elektrárny, přičemž výkon z jednotlivých zdrojů je využit pro nabíjení akumulačního zařízení, ze kterého je následně hrazena spotřeba elektrické energie v samostatné izolované napěťové soustavě. V případě hybridních zdrojů elektrické energie je využita časově odlišná závislost provozu jednotlivých zdrojů. V praxi to znamená, že v zimních měsících, kdy je převažující pro provoz hybridního zdroje energie z větrného proudění, je akumulační zařízení nabíjeno energií z větrné elektrárny. Naopak, v letních měsících, kdy počet dnů s optimálním větrným prouděním je minimální, je akumulační zařízení nabíjeno energií z fotovoltaických panelů. Spojením dvou obnovitelných zdrojů s odlišným principem konverze elektrické energie vzniká jednotný hybridní zdroj s možností napájení izolovaných napěťových soustav, přičemž uvedenou kombinací provozu jednotlivých zdrojů je významně zvýšen a stabilizován interval dodávky elektrické energie. Takto vytvořených hybridních systémů je možné využít pro napájení odlehlých chatových osad, rodinných domů. Systém je taktéž využitelný při napájení veřejného osvětlení, tunelů, počítačových serverů, prostě všude tam, kde by vybudování přípojky na veřejnou síť bylo problematické a taktéž všude tam, kde jsou zvýšeny nároky na stabilitu dodávky elektrické energie. [2]

Na VŠB-TU Ostrava byl vytvořen hybridní napájecí systém sestávající ze dvou fotovoltaických a dvou větrných elektráren, které společně nabíjí akumulátorovou baterii. Baterie dále slouží k napájení dvou lamp veřejného osvětlení. Smyslem tohoto systému je posouzení vlastností různých zdrojů obnovitelné energie a jejich vhodnosti pro použití jako primárního zdroje elektrické energie v místech bez napojení na energetickou rozvodnou síť.

Systém se nachází v areálu univerzity mezi budovou C a menzou a je rozdělen na tři části – dva sloupy veřejného osvětlení a rozvaděč. Na sloupech je vždy umístěna jedna lampa veřejného osvětlení, jeden fotovoltaický panel a jeden generátor větrné elektrárny. Oba sloupy se od sebe navzájem liší, protože na každém sloupu je použita jiná technologie pro přeměnu větrné i sluneční energie a jiná lampa veřejného osvětlení. Právý sloup při pohledu od budovy C budeme označovat jako první a levý jako druhý. Na prvním sloupu se nachází větrná elektrárna s horizontální osou otáčení, monokrystalický fotovoltaický panel a LED svítidlo. Naopak na druhém sloupu je generátor větrné elektrárny s vertikální osou otáčení, polykrystalický fotovoltaický panel a lampa se sodíkovou výbojkou. V centrálním rozvaděči je pak umístěna veškerá elektroinstalace (baterie, regulátory, měniče, jističe, atd.). Oba sloupy hybridního napájecího systému jsou zobrazeny na obrázcích Obr. 1 a Obr. 2.



**Obr. 1 První (pravý) sloup hybridního napájecího systému**



**Obr. 2 Druhý (levý) sloup hybridního napájecího systému**

Princip činnosti celého systému je takový, že všechny 4 zdroje energie (2 větrné a 2 světelné) nabíjí jednu společnou akumulátorovou baterii. Z baterie se zase ve večerních hodinách napájí obě lampy veřejného osvětlení. Dále budou jednotlivě popsány všechny zdroje, spotřebiče i důležité prvky systému.

## **1.1 První sloup**

### **1.1.1 Větrná elektrárna VT1**

Větrná elektrárna je tvořena větrným generátorem AirBreeze. Jedná se o řešení s integrovanou elektronikou, která slouží k regulaci nabíjení baterie. Tím pádem může být generátor připojen přímo na baterii bez jakéhokoliv mezistupně. Jmenovité výstupní napětí je 12V a výkon 200W.

### **1.1.2 Fotovoltaická elektrárna FV1**

Základem FV1 je monokrystalický panel. Výkon panelu je 200W při jmenovitém napětí 18V, napětí naprázdno dosahuje 22V. Panel je přes regulátor připojen k baterii.

### **1.1.3 Veřejné osvětlení VO1**

Svítidlo veřejného osvětlení VT1 je LED lampa o příkonu 40W. Napájecí napětí je 230Vst, a proto musí být mezi baterií a svítidlem zařazen měnič 12Vss/230Vst.

## **1.2 Druhý sloup**

### **1.2.1 Větrná elektrárna VT2**

Větrnou elektrárnu tvoří 3f synchronní generátor s vertikální osou otáčení lopatek rotoru. Výkon generátoru je 200W při jmenovitém napětí 31V. Podle otáček může napětí naprázdno dosáhnout až špičkové hodnoty 50V a frekvence 50Hz. Pro připojení k baterii je nutné použít 3f usměrňovač a regulátor dobíjení.

### **1.2.2 Fotovoltaická elektrárna FV2**

Pro FV2 je použit polykrystalický panel. Maximální výkon panelu je 130W při jmenovitém napětí 17,6V, napětí naprázdno až 22V. Panel je přes regulátor připojen k baterii.

### **1.2.3 Veřejné osvětlení VO2**

Svítilno veřejného osvětlení VT2 je sodíková lampa o příkonu 50W. Napájecí napětí je 230Vst, a proto musí být mezi baterií a svítidlem zařazen měnič 12Vss/230Vst.

## **1.3 Rozvaděč**

Zde je umístěna veškerá elektro výbava hybridního napájecího systému. Jedná se o regulátory, měniče, pojistky, jističe, odpojovače a hlavně akumulátory.

### **1.3.1 Baterie**

V systému jsou použity NiCd akumulátory o jmenovitém napětí 1,2V a kapacitě 340Ah. Pro dosažení jmenovitého napětí baterie 12V je sériově spojeno celkem deset akumulátorů. Napětí nabité baterie je ale vyšší než jmenovité, pohybuje se okolo 14,4V.

## **1.4 Zapojení celého systému**

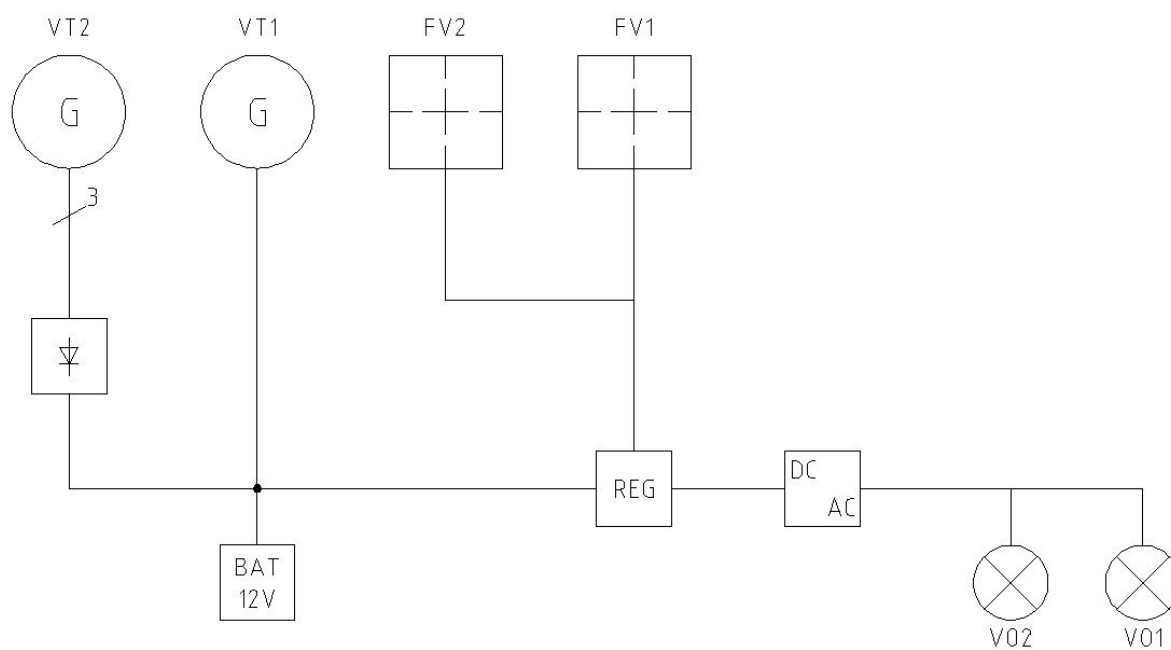
Zapojení bude zde popsáno pouze z hlediska hlavních funkcí a nebudou uvedeny prvky, které nejsou potřebné pro pochopení základních toků výkonů. V popisu jsou zanedbány veškeré ochranné prvky (pojistky, jističe, odpojovače, hlídače napětí, atd.).

Všechny zdroje předávají vyrobenou energii do baterie a to buď přímo, nebo přes regulační prvek. Fotovoltaické panely jsou paralelně spojené a přes společný regulátor dobíjí baterii. Větrná elektrárna VT1 má vestavěný regulátor dobíjení a proto může být přímo napojena na baterii. Naproti tomu nemá větrná elektrárna VT2 zabudovanou žádnou regulační elektroniku a jejím výstupem je 3f napětí o proměnné amplitudě i frekvenci. Zde je mezi generátorem a baterií nutné zařadit usměrňovač a regulátor. Regulátor byl ovšem během provozu systému odstraněn, protože na něm docházelo k nadměrnému úbytku napětí a generátor nebyl téměř schopný dobíjet baterii. Bez regulátoru je již nabíjení funkční a přitom nedochází k přebíjení baterie kvůli malému výkonu generátoru.

Lampy veřejného osvětlení jsou napájeny ze společného střídače – měniče 12Vss/230Vst. Střídač je napájen přes regulátor z baterií. Je to ten regulátor, který nabíjí baterie z fotovoltaických panelů.

Regulátor se stará o správné dobíjení baterie, ale také po setmění spíná lampy veřejného osvětlení. Zároveň hlídá baterii proti nadměrnému vybíjení.

Schéma zapojení celého systému je na Obr. 3.



**Obr. 3** Schéma zapojení hybridního napájecího systému

## **2 Základní návrh monitorovacího systému**

Pro sledování vlastností hybridního napájecího systému bylo nutné vytvořit monitorovací systém, který by měl měřit výkonové parametry všech částí systému a zároveň by měl naměřené hodnoty poskytovat k další analýze. Návrh a vývoj takového systému bylo náplní této diplomové práce. V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé části realizace monitorovacího systému.

### **2.1 Požadavky na monitorovací systém**

Hlavním požadavkem je monitorovat toky výkonů v hybridním napájecím systému. Musí se zaznamenávat všechny veličiny tak, aby bylo možné analyzovat účinnost jednotlivých prvků obvodu. Měření se má provádět v časových intervalech jedné minuty a data se mají ukládat na vzdáleném počítači, kde bude také spuštěna aplikace pro zobrazení výsledků měření.

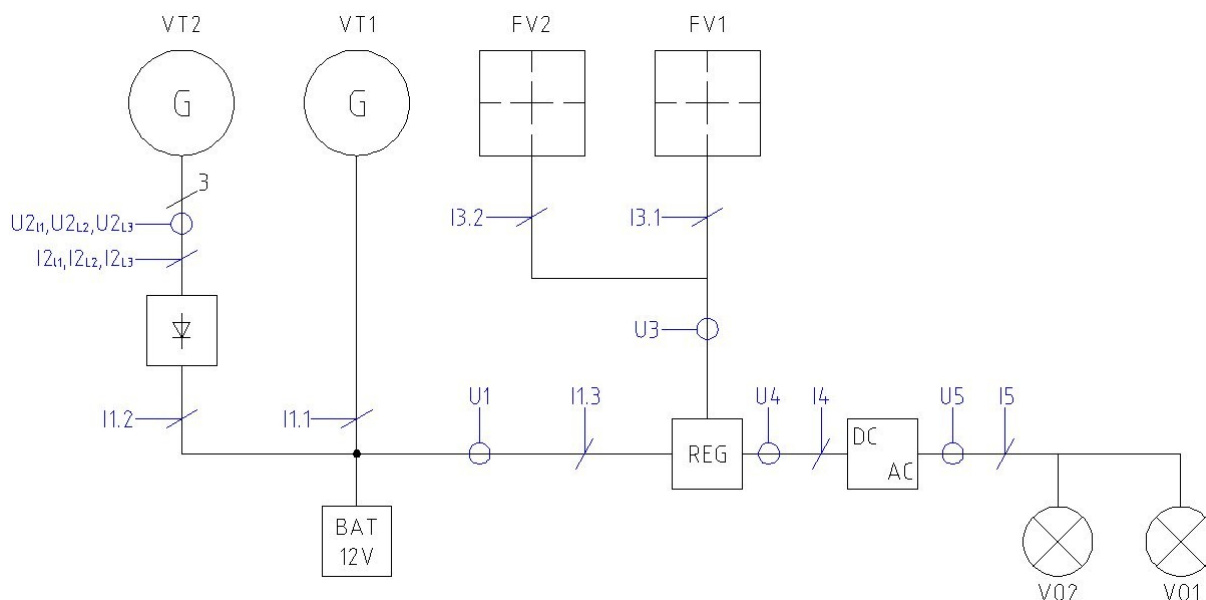
Jak již vyplývá ze zadání diplomové práce, pro realizaci měřicího systému má být použit systém NI cRIO. Téměř celý monitorovací systém (kromě vzdáleného počítače pro ukládání dat) má být umístěn ve stávajícím rozvaděči hybridního napájecího systému. Zde nastává problém s klimatickými podmínkami a se zajištěním nepřetržitého provozu monitorovacího systému, protože do rozvaděče není přivedeno trvalé napájení. Je zde pouze přívod veřejného osvětlení, který je napájen jen ve večerních hodinách za tmy.

Požadavky na monitorovací systém shrnuty v bodech:

- Měřit všechny důležité výkonové parametry
- Měřit v intervalech jedné minuty
- Měřicí HW má být umístěn ve stávající venkovní rozvodní skříni hybridního napájecího systému
- Vizualizace a ukládání dat se má provádět na vzdáleném počítači
- Zabezpečit nepřetržitý provoz (= nepřerušované napájení) monitorovacího systému
- Monitorovací systém nesmí odebírat energii z baterií hybridního napájecího systému

## 2.2 Analýza požadavků

První požadavek na měření všech výkonových parametrů ukládá měřit všechna napětí i proudy ve všech větvích obvodu. Vezmeme-li v úvahu schéma na Obr. 3, vychází celkový počet měřicích bodů na 17. Z toho bude 7 napěťových měřicích bodů a 10 proudových. Znázornění jednotlivých bodů je na Obr. 4.



Obr. 4 Měřicí body monitorovacího systému

### 2.2.1 Popis měřených veličin

**Napětí U1** – je napětí baterie. Jmenovité napětí baterie je 12Vss, ale během nabíjecího cyklu může dosahovat až k 15V.

**Napětí U2L1, U2L2, U2L3** – tato napětí jsou přímým výstupem ze synchronního generátoru, a proto se jejich amplituda i frekvence mění v závislosti na otáčkách rotoru. Velikost napětí může dosáhnout až špičkové hodnoty 50V a frekvence 50Hz.

**Napětí U3** – je napětí fotovoltaických panelů. Jmenovité napětí panelů při plném výkonu je 18Vss, ale naprázdno může dosahovat ke 22V.

**Napětí U4** – je napětí za regulátorem směrem ke střídači. Toto napětí bude dosahovat hodnoty napětí baterie zmenšené o úbytek na regulátoru. Tzn. maximální hodnota nikdy nepřekročí 15Vss.

**Napětí U5** – je napětí za střídačem. Jeho hodnota by měla být 230Vst, ovšem v závislosti na kvalitě měniče a jeho ovlivnění vnějšími vlivy (povětrnostní podmínky a různé zatížení způsobené provozem sodíkové výbojky).

**Proud I1.1** – tento proud teče z první větrné elektrárny přímo do baterie. Výkon generátoru je 200W, což při nabíjecím napětí 14Vss dává proud 14,3A.

**Proud I1.2** – je proud tekoucí z usměrňovače druhé větrné elektrárny do baterie. Výkon generátoru je také 200W, což při zanedbání ztrát na usměrňovači dává také 14,3A.

**Proud I1.3** – má dva různé průběhy. Během dne teče proud z regulátoru do baterie (z fotovoltaických panelů do baterie) a v noci z baterie do regulátoru (do lamp veřejného osvětlení). Proud bude mít kladnou hodnotu, pokud poteče z baterie do regulátoru. Maximální možná hodnota proudu je součtem proudů I3.1 a I3.2 tekoucí přes regulátor do baterie, což činí při celkovém teoretickém výkonu obou panelů 330W až 23,5A.

**Proudy I2.L1, I2.L2, I2.L3** – mají také jako příslušná napětí proměnou frekvenci pohybující se mezi 0 až 50Hz. Fázový proud při jmenovitém výkonu 200W a napětí 31Vst je 6,45A.

**Proud I3.1** – teče z VT1 do regulátoru. Při maximálním výkonu panelu 200W a jmenovitém napětí 18Vss je jeho hodnota 11A.

**Proud I3.2** – teče z VT2 také do regulátoru. Při jmenovitém výkonu 130W je napětí na výstupu panelu 17,6V a proud 7,4A.

**Proud I4** – tento proud teče z regulátoru do střídače. Jeho velikost je dána odebíraným výkonem lamp veřejného osvětlení a účinností měniče. Obě lampy odebírají celkem 90W, výkonovou ztrátu měniče budeme uvažovat 20%, tzn. 18W. Celkově dostáváme výkon 108W tekoucí do měniče a při napětí baterie 14V bude proud 7,7A. Ovšem při nižším napětí se proud zvyšuje a může překročit hranici 10A.

**Proud I5** – střídavý proud tekoucí do lamp veřejného osvětlení. Při odběru lamp 90W a jmenovitém napětí 230Vst dostáváme proud 0,4A.

## 2.2.2 Rozbor problematiky výpočtu výkonů

Smyslem monitorovacího systému je monitorovat toky výkonů v systému hybridního napájení. Výkony lze vypočítat z hodnot jednotlivých proudů a napětí v příslušných větvích obvodu. Podmínkou pro získání správných hodnot je použití vhodného matematického aparátu. U stejnosměrných veličin je situace jednoduchá, ale při střídavých veličinách se teorie zesložituje.

V obvodu napájeném ze stejnosměrného zdroje je výkon odebíraný zátěží [3]

$$P = U * I \quad [W; V, A] \quad (1)$$

Při měření výkonu střídavého proudu je definován činný (P), jalový (Q) nebo zdánlivý (S) výkon. Zdánlivý výkon se obvykle zjišťuje ze součinu efektivních hodnot napětí a proudu [3]

$$S = U * I \quad [VA; V, A] \quad (2)$$

Činný výkon je střední hodnota ze součinu okamžitých hodnot napětí a proudu [3]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) * i(t) dt \quad [W; s, W; s, V, A] \quad (3)$$

Zdánlivý výkon (potažmo i ostatní výkony) lze také vyjádřit vztahem



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [VA; V, A] \quad (4)$$

Další problém nastává pro vyhodnocení výkonu napětí a proudů  $U_2$  a  $I_2$ . Generátor dodávající tento výkon je třífázový, ale nemá vyvedený střední vodič. Toto zapojení se nazývá třívodičová síť. Řešením je použití buď Aronova zapojení, které využívá pouze dva wattmetry, anebo použít wattmetry tři a vytvořit tzn. umělou nulu. Byla vybrána druhá možnost, aby byl přehled o všech fázových napětích a proudech. Při tomto zapojení neodpovídají údaje wattmetrů výkonům v jednotlivých fázích, ale součet údajů dává celkový třífázový výkon. [3]

Při měření třemi wattmetry v třívodičové síti je celkový výkon dán součtem výkonů naměřených jednotlivými wattmetry [3]

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt \quad [VA; VA; s, V, A] \quad (5)$$

### 2.2.3 Problematika umístění monitorovacího systému

Měřicí část monitorovacího systému má být umístěna ve venkovním rozvaděči. Tomu se musí přizpůsobit veškerý hardware. Zásadní je pracovní teplota jednotlivých komponent. Teplota v rozvaděči se bude pohybovat v závislosti na ročním období od  $-20$  do  $50^\circ\text{C}$ . Toto musí být bezpodmínečně zohledněno při návrhu systému. Zlepšení těchto teplotních podmínek není možné, protože rozvaděč nelze vyhřívat ani odvětrávat.

### 2.2.4 Napájení monitorovacího systému

Do rozvaděče není zavedena přípojka elektrické sítě. Je zde pouze vyvedeno napájení veřejného osvětlení navazující na veřejné osvětlení v areálu univerzity. Jedná se o jednu fázi střídavého napětí 230V. Problém je v tom, že doba zapnutí tohoto přívodu se řídí ročním obdobím a délkou noci, protože veřejné osvětlení je v této lokalitě spínáno soumrakovým spínačem. V létě bude tato doba okolo osmi hodin a v zimě naopak až 16 hodin.

### 2.2.5 Komunikační propojení měřicí části a vzdáleného PC

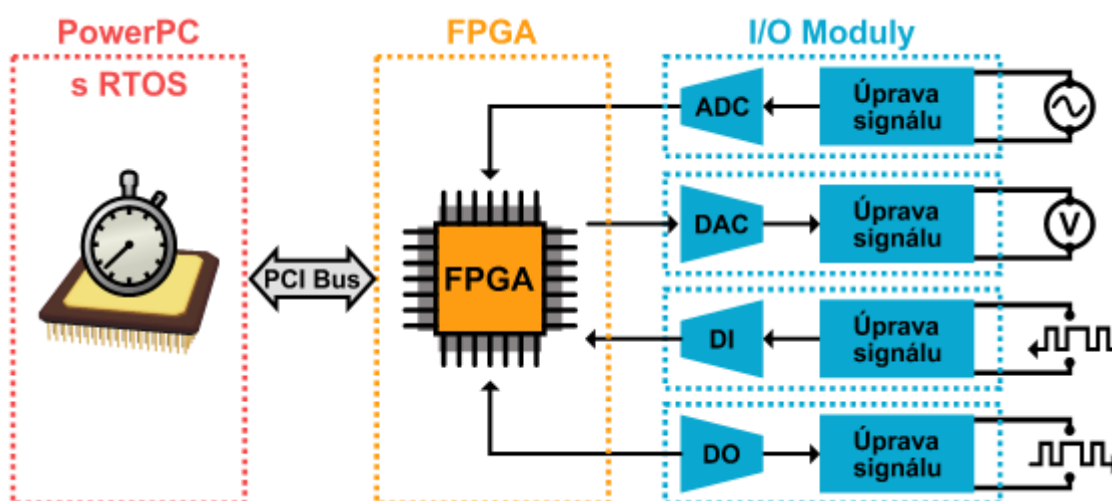
Dalším z požadavků je ukládání a vizualizace dat na vzdáleném počítači. Požadavek na „vzdálený počítač“ vznikl z důvodu nemožnosti uložení klasického počítače do venkovního rozvaděče a současné potřeby počítače pro dlouhodobé ukládání a vizualizaci dat, což není na systému cRIO obvyklé. Naopak umístění počítače uvnitř univerzitní budovy bude mít výhodu v jeho snadné dostupnosti při potřebě jakékoliv změny v jeho nastavení. Jedinou překážkou tohoto řešení je nutnost vytvoření vzájemného komunikačního propojení mezi PC a systémem cRIO, protože ve venkovním rozvaděči není žádný přívod datové sítě.

## 2.3 Volba komponent monitorovacího systému

Celý monitorovací systém lze rozdělit do několika částí. Podle umístění jej můžeme dělit na část, která má být umístěna v rozvaděči hybridního napájecího systému, a na část vzdáleného počítače pro ukládání a zobrazování naměřených dat. Část umístěnou v rozvaděči lze ještě rozdělit na měřicí část, část napájení a komunikace. V následujících podkapitolách budou tyto části popsány.

### 2.3.1 Měřicí část

Hlavním prvkem měřicí části je systém NI cRIO (Obr. 5). Jedná se o malý a výkonný modulový měřicí systém, který je svými vlastnostmi přímo předurčen pro základ monitorovacího systému. Díky integrovanému FPGA a kontroléru s real-time operačním systémem zvládne jednoduše požadavek na rychlé vyhodnocení měřených veličin i při zachování malých rozměrů a nízké spotřeby energie. Vstupy a výstupy lze jednoduše nakonfigurovat pomocí zásuvných měřicích karet. Datové propojení s okolním světem lze uskutečnit pomocí zabudovaného Ethernet rozhraní. A velmi podstatným faktem je, že systém cRIO má široký rozsah provozních teplot, čímž vyhovuje požadavku na venkovní umístění.



Obr. 5 Blokové schéma systému cRIO

Konkrétně byl zvolen typ NI cRIO-9074. Jedná se o šasi s integrovaným kontrolérem, které má 8 slotů pro V/V karty, 400MHz real-time kontrolér a 2MGate FPGA Xilinx Spartan-3. Dále obsahuje jeden sériový a dva ethernetové porty. Real-time kontrolér má k dispozici 128MB RAM a 256MB pro data. CRIO vyžaduje napájecí napětí 19-30VDC a rozsah provozních teplot je -20 až 55°C. Tento měřicí systém splňuje všechny zadané požadavky a také bude poskytovat dostatečný výkon pro samotný běh měření a vyhodnocování naměřených dat v reálném čase.

Pro cRIO ovšem neexistují V/V moduly, které by byly schopné přímo měřit požadované rozsahy napětí a proudů v měřeném systému hybridního napájení (anebo existují moduly, které splňují tyto

požadavky pouze částečně). Nejjednodušším se jeví použití převodníků napětí a proudů, které mají určitým způsobem normalizovanou výstupní veličinu. Vhodné převodníky jsme našli u firmy LEM.

Požadavek je měřit všechny výkony v systému hybridního napájení, tzn. 10x proud a 7x napětí (dle Obr. 4). Navíc každá veličina bude mít jinou velikost a také se bude jednat o ss i st veličiny. Pro měření proudů lze tuto skutečnost obejít použitím převodníků, které umožňují nastavit měřený rozsah. Byl zvolen převodník proudu LEM LA 25-NP, který má nastavitelné rozsahy v rozmezí 5 až 25A a šířku pásma 0-150kHz. Tento převodník bude použit pro všechny proudové měřicí body. Pro napětí je situace složitější. Pro napětí U1-U3 budou použity převodníky LEM AV100-50. Ty poskytují nejmenší dostupný napětíový rozsah ze všech převodníků firmy LEM a to 50V rms při šířce pásma 0-11kHz. Teoreticky by tyto převodníky nemusely být pro měření vůbec použity (stačily by obyčejné děliče napětí), ale kvůli galvanickému oddělení a riziku zničení měřicího zařízení cRIO po úderu blesku se do obvodu raději zařadily. Ze stejného důvodu je použit převodník i pro napětí U4 a U5. Zde se ale bude měřit vyšší napětí (U5 - 230VAC), a proto bude použit jiný převodník - LEM LV 25-P/SP2. Tento má podobné vlastnosti jako ten předchozí a navíc umožňuje nastavit měřený rozsah pouhou změnou předřazeného rezistoru. Všechny převodníky LEM zajišťují galvanické oddělení měřeného obvodu od měřicího systému a mají proudový výstup 25 nebo 50mA, což je snadno měřitelný rozsah.

Vhodný výběr měřicích převodníků, které mají podobné výstupní veličiny, dovoluje použít pouze jednu měřicí kartu. Vzhledem k vysokému počtu měřených vstupů byla vybrána karta NI 9205. Tato karta má 32 analogových vstupů, vstupní rozsahy od  $\pm 200\text{mV}$  do  $\pm 10\text{V}$ , rozlišení 16 bitů a rychlost vzorkování 250kS/s. Navíc má karta po jednom digitálním vstupu i výstupu. Karta má agregované měřicí vstupy, a proto se rychlost vzorkování při 17 měřicích vstupech zmenší na cca. 14,7kS/s/kanál. S tímto faktem se musí počítat při dalším návrhu měřicího systému. Proudové výstupy z měřicích převodníků musí být převedeny na napětíový signál, aby je bylo možné měřit touto kartou. Toho se dosáhne použitím jednoduchého převodníku proud-napětí realizovaného pomocí přesného rezistoru.

Dále bude použita karta digitálních výstupů NI 9472. Tato karta má 8 digitálních výstupů, které budou použity pro spínání napájení měřicích převodníků a WiFi zařízení. Tím se ušetří energie, která by se zbytečně spotřebovávala při nečinnosti během prodlevy mezi jednotlivými měřeními.

Základ měřicího HW je popsán, ale nesmí být opomenuty anti-aliasing filtry. AA filtry jsou velmi důležité pro správnost měření. Při návrhu filtrů se musí dodržet Nyquistův teorém a současně přihlídnout k vlastnostem reálného filtru. Maximální možná vzorkovací frekvence měřicí karty je 14,7kS/s/kanál. Podle toho byl navržen odpovídající aktivní filtr typu dolní propust s charakteristickým kmitočtem 5kHz. Filtr je čtvrtého řádu a je navržen podle Bessela.

### 2.3.2 Napájení měřicí části

Do rozvaděče není přivedeno žádné trvalé napájení. Je zde pouze přívod veřejného osvětlení, který je ale sepnut pouze v nočních hodinách. Musí se tedy zabezpečit nepřerušované napájení měřicího systému i během dne. Možným řešením je použití systému UPS. Tento systém bude sestaven z vhodné baterie a nabíječe. Baterie musí mít napětí 24V, kvůli napájecímu napětí systému cRIO, a musí mít

dostatečnou kapacitu, aby dokázala napájet celý měřicí systém po požadovanou dobu. Měřicí převodníky LEM mají ovšem napájecí napětí  $\pm 15V$  a WiFi zařízení 9V. Tato napětí se získají použitím DC/DC měničů.

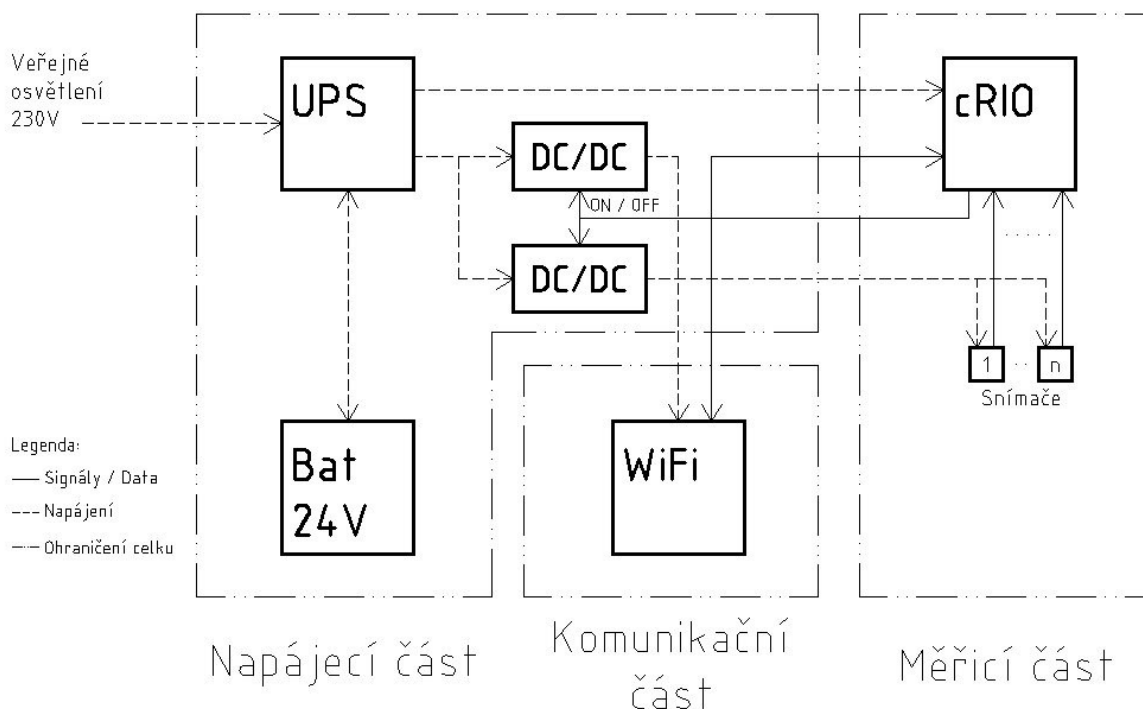
Odběr měřicího systému bude tvořen spotřebou systému cRIO, spotřebou měřicích převodníků a WiFi zařízení. cRIO má maximální spotřebu 20W, převodníky a WiFi zařízení i s DC/DC měniči budou odebírat téměř 40W. Tento odběr je příliš vysoký, aby se dal realizovat při použití baterie rozumného rozměru. Prostor pro měřicí systém je totiž omezen vnitřním rozměrem rozvaděče. Možností se jeví odpojování nepotřebných zařízení v době jejich nečinnosti. Vlastní měření bude probíhat pouze po dobu několika málo sekund každou minutu. Měřicí převodníky mohou být tedy převážnou většinu času vypnuty. To samé platí pro WiFi zařízení, které může být zapnuté pouze po dobu přenosu dat. Spínání těchto zařízení bude zajišťovat karta digitálních výstupů NI 9472. DC/DC měniče pro napájení měřicích převodníků a AA filtrů, které mají napájecí napětí  $\pm 15V$ , budou od firmy Traco Power. V jejich portfoliu jsou měniče o výkonech 15-30W se vstupním napětíovým rozsahem 18-36V a výstupním napětím  $\pm 15V$ . Měníče dosahují účinnosti 89%. Pro napájení WiFi zařízení (napětí 9V) nenabízí firma Traco Power vhodnou alternativu, a proto bude použit měnič vlastní konstrukce založený na integrovaném obvodu LM2575. Účinnost zapojení by se měla pohybovat okolo 80%.

Pokud tedy budeme uvažovat spotřebu celého měřicího systému 24W (při vypínání nepotřebných částí) a nejdelší možný provoz z baterie 18 hodin (v létě svítí veřejné osvětlení 6 hodin denně), pak potřebujeme baterii o kapacitě alespoň  $18h \cdot 1A = 18Ah$ . Vybíjením baterie až na její maximum je ale velmi nevhodné, kvůli zkrácení její životnosti. Ideální je vybíjet baterii pouze na 70% jmenovité kapacity, čímž se prodlouží životnost z 200 na 2500 cyklů, což znamená téměř sedm let provozu. Tato data platí pro námi vybrané baterie EnerSys PowerSafe SBS. Konkrétně byly zvoleny baterie SBS C11 o jmenovitém napětí 12V a kapacitě 92Ah. Pro 24V provoz budou zapojeny dvě baterie sériově. Baterie jsou bezúdržbové, uzavřeného typu a jsou přímo určeny pro zálohovací systémy s častým cyklováním. Teoreticky by měly být baterie schopné napájet měřicí systém po dobu několika dní, kdyby došlo k poruše nebo výpadku veřejného osvětlení.

O nabíjení baterií se bude starat nabíječ XP Power DNR240PS24-BC, což je nabíječ pro 24V baterie s výstupním výkonem 240W. Nabíječ je dostatečně výkonný, aby dokázal nabít baterie i během šesti hodin dostupnosti napětí v síti veřejného osvětlení. Dále bude k bateriím připojen odpojovač Vums Powerprag LVD-24V, který bude baterie hlídat proti nadměrnému vybití. Oba tyto komponenty společně s baterií tvoří napájecí UPS systém.

### **2.3.3 Komunikace měřicí části se vzdáleným počítačem**

Komunikace mezi měřicím systémem a vzdáleným PC bude probíhat po vnitřní síti VŠB-TUO. Měřicí systém, konkrétně cRIO, bude propojeno se školní sítí pomocí bezdrátového WiFi připojení. Systém cRIO má vestavěné dva ethernetové porty, z nichž jeden bude připojen do WiFi AP umístěného ve venkovní rozvodní skříni společně s měřicím HW. Do rozvodnice není přiveden žádný datový kabel, takže WiFi připojení je jediná možnost komunikace s okolním světem. Vzdálené PC bude do školní sítě také připojeno.



**Obr. 6** Blokové schéma části monitorovacího systému, který bude umístěn ve venkovním rozvaděči

Celkový pohled na část monitorovacího systému, která má být umístěna ve venkovním rozvaděči, poskytuje blokové schéma na Obr. 6. Jsou zde zobrazeny hlavní konstrukční celky systému se vzájemným signálovým propojením i s naznačeným napájecím vedením. Pro přehlednost a jednoduchost schématu zde nejsou zakresleny pomocné obvody (např. anti-aliasing filtry) a celky se stejnou funkcí jsou zakresleny jako jeden společný blok (např. DC/DC měniče).

### 2.3.4 Vzdálený počítač

Vzdálený počítač bude sloužit k ukládání a zobrazování naměřených dat. Systém cRIO bude tomuto počítači posílat naměřená data, ta se budou ukládat ve vhodném formátu, aby je bylo možné jednoduše zpracovávat, a následně se budou data zobrazovat ve webové vizualizaci. Tato vizualizace bude dostupná na univerzitní síti VŠB-TUO a oprávnění uživatelé si budou moci prohlédnout fungování hybridního napájecího systému.

### 3 Výroba elektroniky monitorovacího systému

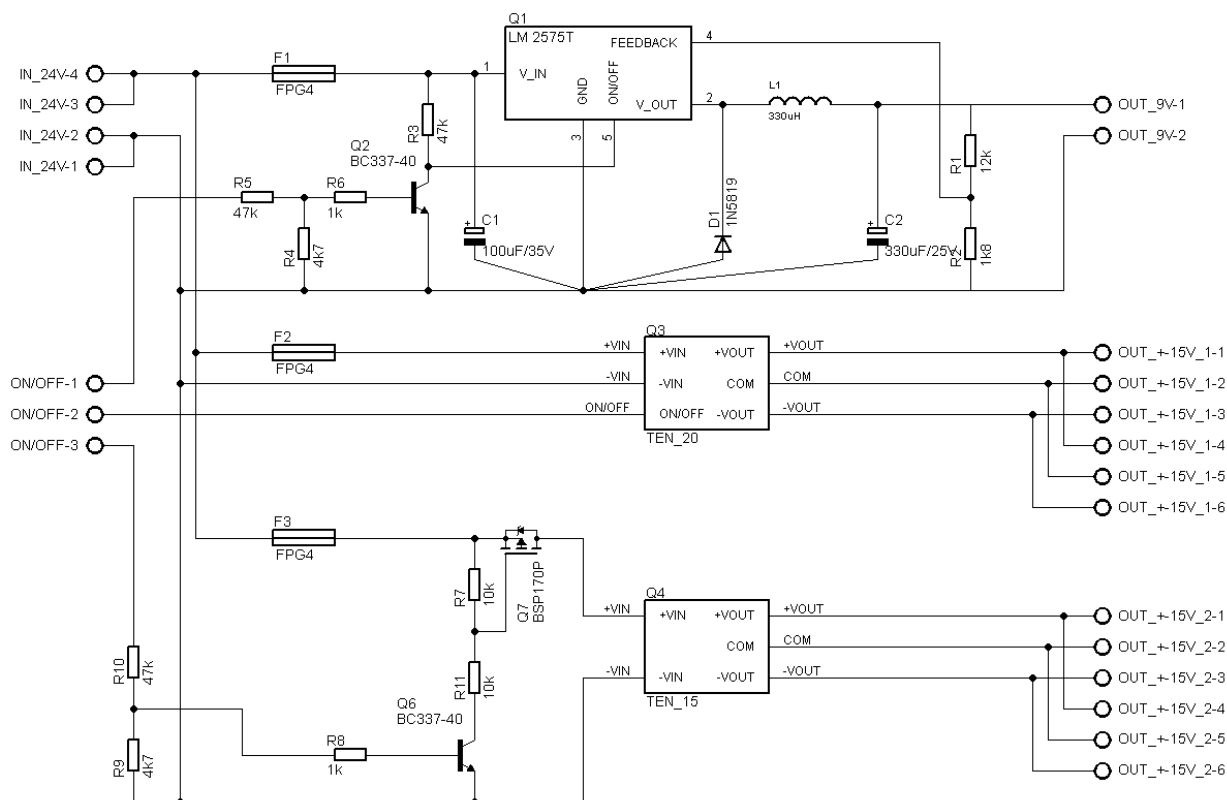
Ne všechny komponenty pro sestavení monitorovacího systému lze koupit hotové, a proto bylo nutné zhotovit vlastní elektroniku. Jednak byly navrženy a vyrobeny desky plošných spojů s převodníky napětí a proudů, ale také DPS pro anti-aliasing filtry a napájecí zdroj. Návrh schémat byl proveden pomocí SW nástroje Eagle firmy CadSoft. Následně byly vyrobeny desky plošných spojů (osvit, leptání, vrtání, povrchová úprava). Poslední etapou výroby elektroniky, ale jistě ne konečnou fází realizace monitorovacího systému, bylo osazení DPS elektronickými součástkami.

#### 3.1 Napájecí část

Napájecí část musí poskytnout několik výstupních napětí, proto se skládá z více samostatných zdrojů (Obr. 6). NI cRIO vyžaduje napájecí napětí v rozsahu 18-30Vss. Je tedy napájeno přímo z 24V baterie, přesněji řečeno z UPS zdroje. UPS ale není nic jiného než nabíječ a odpojovač baterie. Nabíječ je připojen na veřejné osvětlení a přes noc nabíjí baterii. A z baterie se napájí všechny spotřebiče (cRIO a DC/DC měniče) přes odpojovač baterií. Odpojovač zamezuje zničení baterie hlubokým vybitím. Při poklesu napětí na baterii pod nastavenou hodnotu (standardně 21,6V pro 24V Pb baterii) se od baterie odpojí zátěž a nedochází k dalšímu vybíjení. Při zapnutí nabíječe se sepne i odpojovač a spotřebiče budou opět pod napětím. Všechny tyto komponenty jsou hotové komerční produkty a není k nim nutné sestavovat žádnou dodatečnou elektroniku.

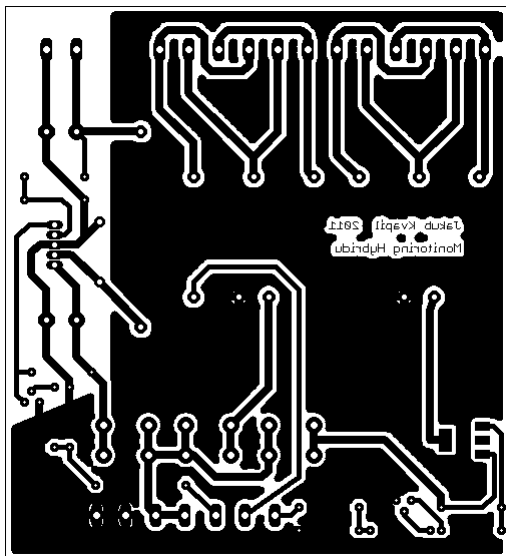
Vlastní elektroniku bylo nutné sestavit až v tomto případě. Převodníky napětí a proudů LEM mají totiž napájecí napětí  $\pm 15V_{ss}$ . Kvůli požadavku na zdánlivě velké proudové odběry bylo nutné použít dva DC/DC měniče, Traco TEN-15 a TEN-20. Další měnič s výstupním napětím 9V slouží k napájení WiFi zařízení. Tento byl postaven na základě integrovaného obvodu LM2575T ve svém katalogovém zapojení. Kvůli již zmiňované úspoře energie se budou tyto měniče vypínat v době, kdy nebude probíhat měření. Každý měnič má tedy vstup pro ovládání.

Pro oba měniče Traco i integrovaný obvod LM2575T bylo nutné vytvořit knihovny součástek, protože takové ještě neexistovaly. Zapojení je provedeno na jednostranné desce plošných spojů o rozměrech 85x93 mm. Deska je navržena pro vsazení do modulové krabičky, která umožňuje připevnění na DIN lištu. Schéma zapojení, desky plošných spojů a osazovací plán jsou na Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9.

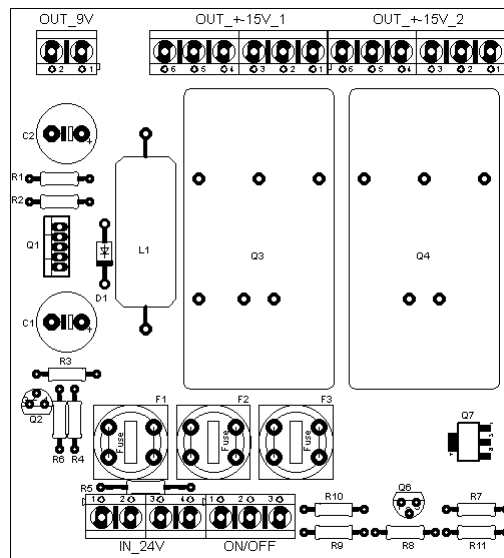


**Obr. 7 Schéma zapojení napájecí části**

Na schématu zapojení (Obr. 7) lze jasně vidět tři DC/DC měniče (Q1, Q3 a Q4). Všechny měniče jsou napájeny ze společného napájení 24V (přivedeno z UPS), každý měnič je jištěn vlastní pojistkou (F1, F2 a F3) a také má každý měnič vlastní spínací vstup (ON/OFF). Na tyto vstupy lze přivést napětí 0V nebo 24V. Při 0V je příslušný měnič vypnutý, při 24V je zapnutý. 24V logika byla zvolena kvůli napájecímu napětí celého monitorovacího systému. Některé svorky byly zdvojeny, protože na ně bylo potřeba připojit více zařízení.



Obr. 8 Motív desky plošných spojů (zrcadlově)



Obr. 9 Osazovací plán desky plošných spojů

### 3.2 Měřicí část

Měřicí část zahrnuje všechny převodníky napětí a proudů a elektroniku pro úpravu signálu. Každý převodník je tedy doplněn anti-aliasing filtrem. Filtr je dolní propust 4. řádu s charakteristickou frekvencí 5kHz navržena podle Bessela [4]. Kromě napěťových převodníků LEM AV100-50 jsou všechny převodníky umístěny na desce plošných spojů společně s filtry. Převodníky AV100-50 jsou umístěny poblíž desky plošných spojů. Převodníky pro napětí U4 a U5 mají předřazen snímací rezistor takové velikosti, aby jím při nominálním měřeném napětí tekla proud 10mA. Pro napětí  $U_4=15V$  vychází velikost měřicího rezistoru na  $1,5k\Omega$ . Ztrátový výkon rezistoru by měl být alespoň  $0,15W$ . Pro napětí  $U_5=250V$  bude mít měřicí rezistor velikost  $25k\Omega$ . Na tomto rezistoru bude ovšem vznikat výkonová ztráta  $2,5W$ , a proto budou použity tři rezistory  $8,2k\Omega/1W$  zapojené v sérii. Za každým převodníkem je dále zařazen přesný rezistor sloužící jako převodník proud-napětí. Výstupem převodníků jsou totiž proudy o hodnotách 25 nebo 50mA. Rezistory jsou voleny tak, aby na nich vznikala co možná nejvyšší úbytek napětí s ohledem na výrobcem doporučené hodnoty rezistorů a vstupní rozsah měřicího modulu analogových vstupů systému cRIO, což je napětí do 5V.

Návrh měřicích rezistorů je proveden v Tabulce 1. Jsou zde vypočteny jednotlivé převodní poměry na všech měřených kanálech (poměry jsou ve standardním tvaru výstup ke vstupu). Lze si povšimnout, že většina rozsahů byla navržena s určitou rezervou pro případ přetížení. Pokud by se tato rezerva neuvažovala, při přetížení by sice nedošlo ke zničení měřicí elektroniky, ale přetížení by nebylo správně zaznamenáno. Došlo by pouze k saturaci elektroniky a byla by zaznamenána konstantní hodnota.



Tabulka 1 Měřicí rezistory a převodní poměry pro jednotlivé měřené kanály

Měřený vstup	Max. měřená hodnota	Typ LEM převodníku	Nastavený vstupní rozsah převodníku	Převodový poměr převodníku	Měřicí rezistor	Převodový poměr rezistoru	Převodový poměr celkový
I1.1	10A DC	LA 25-NP	12A	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I1.2	10A DC	LA 25-NP	12A	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I1.3	20A DC	LA 25-NP	25A	25mA / 25A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 25A
I2.L1	10A 0-50Hz	LA 25-NP	12A RMS	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I2.L2	10A 0-50Hz	LA 25-NP	12A RMS	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I2.L3	10A 0-50Hz	LA 25-NP	12A RMS	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I3.1	10A DC	LA 25-NP	12A	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I3.2	10A DC	LA 25-NP	12A	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I4	10A DC	LA 25-NP	12A	25mA / 12A	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 12A
I5	0,5A AC 50Hz	LA 25-NP	5A RMS	25mA / 5A	200 Ω	5V / 25mA	5V / 5A
U1	15V DC	AV 100-50	50V	50mA / 50V	150 Ω	7,5V / 50mA	7,5V / 50V
U2.L1	35V 0-50Hz	AV 100-50	50V RMS	50mA / 50V	100 Ω	5V / 50mA	5V / 50V
U2.L2	35V 0-50Hz	AV 100-50	50V RMS	50mA / 50V	100 Ω	5V / 50mA	5V / 50V
U2.L3	35V 0-50Hz	AV 100-50	50V RMS	50mA / 50V	100 Ω	5V / 50mA	5V / 50V
U3	15V DC	AV 100-50	50V	50mA / 50V	150 Ω	7,5V / 50mA	7,5V / 50V
U4	15V DC	LV 25-P/SP2	15V	25mA / 15V	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 15V
U5	230V AC 50Hz	LV 25-P/SP2	246V RMS	25mA / 246V	150 Ω	3,75V / 25mA	3,75V / 246V

Jak již bylo řečeno výše, součástí každého měřicího kanálu je anti-aliasing filtr. Úkolem tohoto filtru je odfiltrovat z měřeného signálu frekvenční složky, které již není možné změřit měřicí kartou a mohly by nepříznivě ovlivnit interpretaci naměřených dat. Použitá měřicí karta – modul NI9205 má maximální vzorkovací frekvenci 250 kS/s (250 000 vzorků za sekundu). Tato rychlost je ovšem rozdělena mezi všechny kanály a při využití 17 kanálů je možné každý kanál vzorkovat maximálně:

$$f_{smax17} = \frac{f_{smax}}{17} = \frac{250000}{17} \doteq 14,7 \text{ kS/s} \quad (6)$$

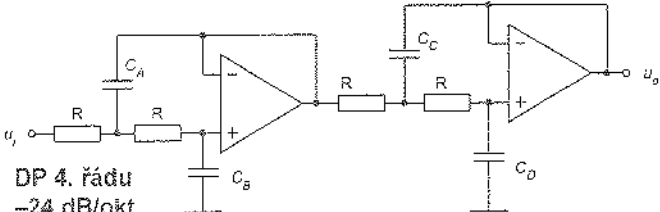
Dále je nutné splnit Nyquistův teorém:

$$f_s \geq 2 * B \quad [Hz; Hz] \quad (7)$$

Šířka pásma  $B$  byla zvolena tak, aby se věrně interpretovaly signály obsahující i 50. harmonickou 50Hz signálu. V měřeném obvodu jsou totiž zařazeny různé spínané prvky, kde se mohou vyskytovat vyšší harmonické. Charakteristická frekvence AA filtru byla zvolena 5kHz, což poskytuje dostatečnou rezervu pro všechny zamýšlené měřené signály. Dále platí obecné pravidlo, aby byla frekvence vzorkování 5 až 10 krát větší než šířka pásma. Frekvence pro 50. harmonickou je 2500Hz a frekvence vzorkování měřicího modulu dosahuje 15kHz pro každý kanál, takže i toto pravidlo je splněno.

Samotný filtr byl navržen podle pramene [4]. Je to aktivní dolnoproustní filtr 4. řádu s charakteristikou podle Bessela. Besselovy filtry se vyznačují výbornou fázovou frekvenční charakteristikou na úkor amplitudové frekvenční závislosti, která je horší než u jiných filtrů. Filtr má

ovšem nezkrácený přenos impulzů, které se v měřené aplikaci mohou vyskytovat kvůli spínaným prvkům.

Zapojení	Bessel	Poznámky
	$C_A = 0,7298 / [R \cdot 2\pi f_3]$ $C_B = 0,6699 / [R \cdot 2\pi f_3]$ $C_C = 1,0046 / [R \cdot 2\pi f_3]$ $C_D = 0,3872 / [R \cdot 2\pi f_3]$	$R = 4k7 \text{ až } 10k$

Obr. 10 Zapojení DP filtru 4. řádu podle Bessela a výpočet pasivních prvků [4]

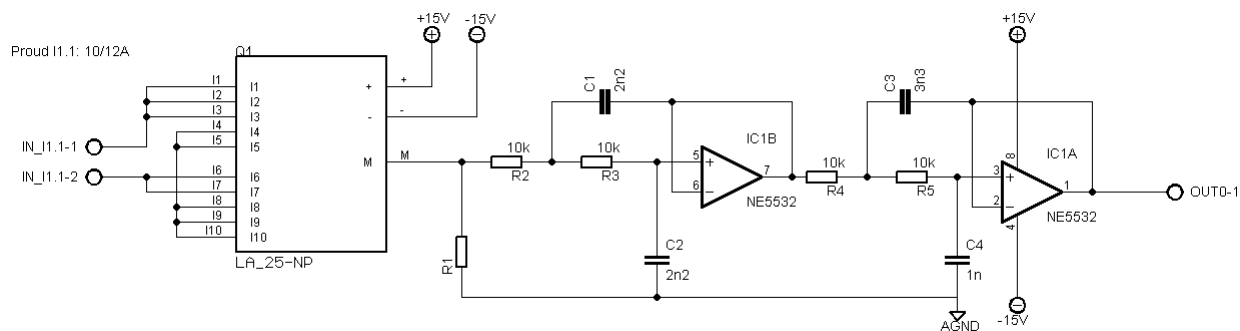
Dle vztahů uvedených na Obr. 10 byly navrženy hodnoty pasivních součástek pro sestavení filtru.

Tabulka 2 Vypočtené hodnoty pasivních prvků AA filtru

R [Ω]	10000
Ca [F]	2,323E-09
Cb [F]	2,132E-09
Cc [F]	3,198E-09
Cd [F]	1,232E-09

Vypočtené hodnoty pasivních prvků jsou uvedeny v Tabulce 2. Bylo vybráno řešení, kde se vypočtené hodnoty co nejvíce blíží hodnotám součástek dostupných v běžném prodeji. Tím se ale mírně posune charakteristická frekvence filtru. Ta se ověří při následném proměření amplitudové frekvenční charakteristiky.

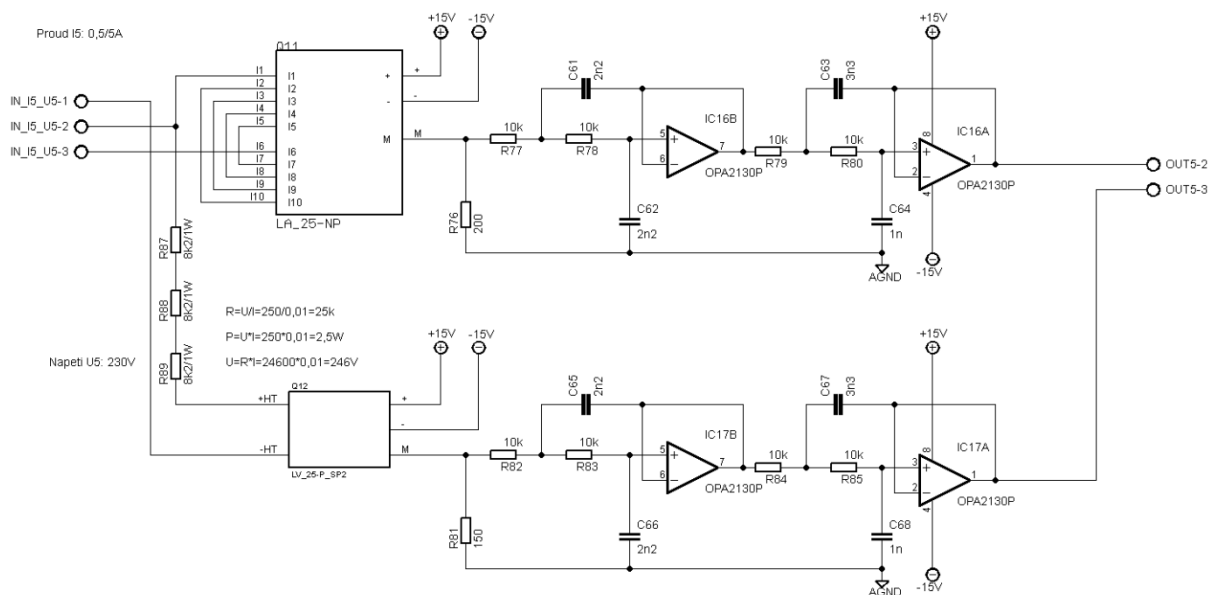
Filtry jsou totožné pro všech 17 kanálů, proto je na Obr. 11 uvedeno schéma zapojení pouze jednoho kanálu.



**Obr. 11 Schéma zapojení DP filtru i s převodníkem LEM**

Konkrétně je na Obr. 11 vyobrazen celý kanál pro měření proudu I1.1, tzn. převodník LEM i AA filtr. Převodník je zapojen podle svého katalogového zapojení, vstupy jsou pospojovány tak, aby se dosáhlo potřebného převodního poměru. Za převodníkem následuje měřicí rezistor R1. Hodnota není na schématu uvedena, ale odpovídá Tabulce 1. Za rezistorem již následuje DP filtr. Skládá se z dvojitého nízkošumového operačního zesilovače NE5532 a pasivních součástek vycházejících z početního návrhu. Operační zesilovač sdílí s převodníkem společné napájení, které produkují DC/DC měniče popsané v minulé kapitole.

Všechny ostatní kanály jsou zapojeny obdobně, na Obr. 12 je pro ukázkou schéma zapojení společného napěťového i proudového kanálu U5 a I5.

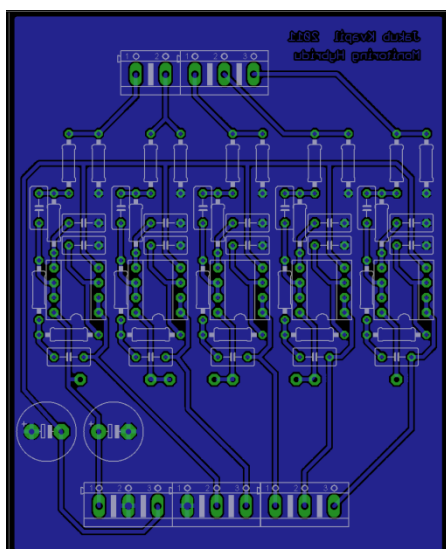


**Obr. 12 Schéma zapojení pro napěťový a proudový kanál U5 a I5**

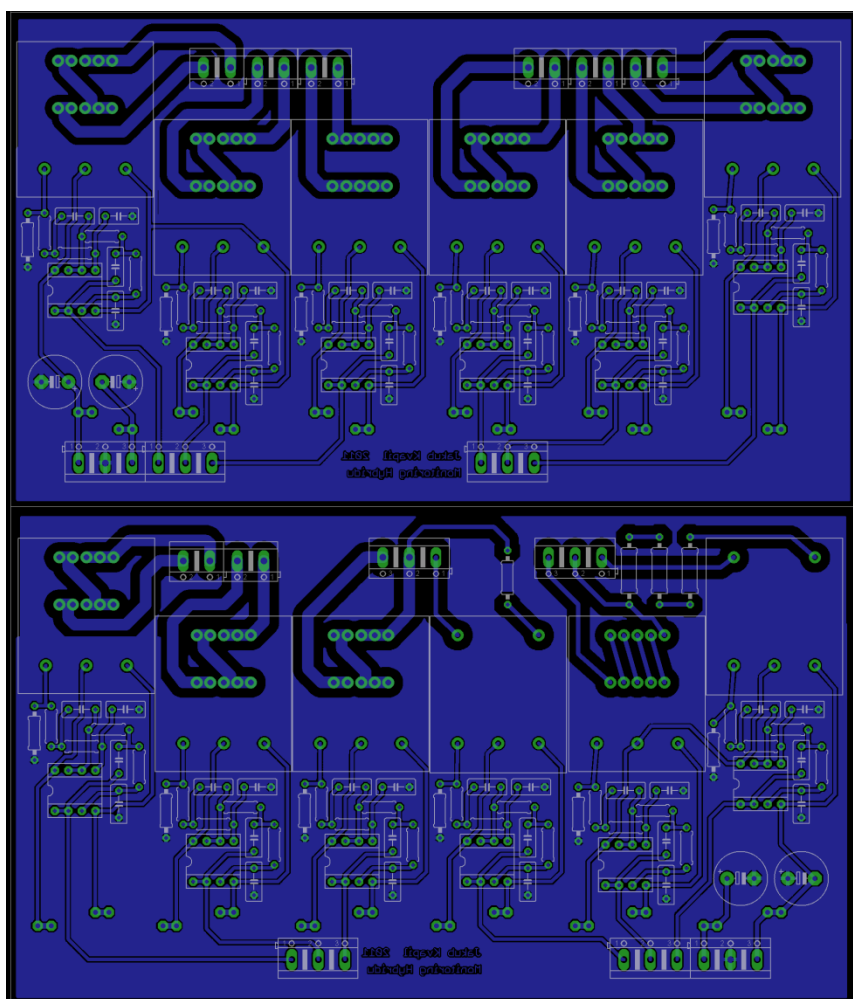
U napětového kanálu U5 si lze povšimnout předřazených rezistorů před převodníkem. Rezistory musí být tři kvůli velké výkonové ztrátě a také kvůli zmenšení napětového namáhání. Při použití jednoho rezistoru by na něm bylo plné napětí 230V. Sice není problém koupit rezistor s takovouto napětovou pevností, ale vzhledem k povětrnostním podmínkám, ve kterých má být zařízení umístěno, je lepší volit řešení rozdělení zátěže.

Pro prvních pět napětových kanálů (U1 až U3) je prostorové uspořádání trochu odlišné, protože příslušné napětové převodníky jsou umístěny mimo DPS. Elektrické zapojení je ale totožné s dříve popsanými.

Všechna měřicí elektronika je umístěna na třech jednostranných DPS. První deska obsahuje měřicí rezistory a AA filtry pro prvních pět napětových kanálů U1 až U3. Rozměr desky je 75x93 mm. Na druhé desce se nachází prvních šest proudových kanálů společně i s převodníky a na třetí desce zbylé proudové i napětové kanály také s převodníky. Rozměry těchto dvou desek jsou shodné – 159x93 mm. Na Obr. 13 a 14 jsou vyobrazeny motivy desek i jejich osazení. Z prostorových důvodů jsou zde zobrazeny pouze společné obrazce motivu i osazovacího plánu jednotlivých DPS. Samostatné motivy desek a osazovací plány jsou přiloženy v příloze.



Obr. 13 DPS pro prvních pět napětových kanálů (U1 až U3)



Obr. 14 Další dvě DPS měřicí elektroniky – druhá deska nahoře, třetí deska dole

### 3.3 Samotná výroba desek plošných spojů a sestavení elektroniky

Při výrobě DPS byla využita technologie pozitivní fotocesty. Metoda spočívá v osvětlení motivu na desku plošných spojů opatřenou fotocitlivým lakem. Motiv (např. Obr. 8) se pomocí laserové tiskárny vytiskne na průhlednou fólii. Fotocitlivý lak na DPS se osvítlí skrze tuto fólii UV světlem a v místech osvětlení se naruší jeho struktura a odolnost vůči chemikáliím. Lak se na osvětlených místech odstraní pomocí roztoku hydroxidu sodného a tím na DPS vzniká maska pro leptání propojovacích cest.

Leptání desek bylo provedeno pomocí chloridu železitého. Po vyleptání a očištění se musí desky znovu osvětlit UV světlem, aby bylo možné odstranit zbylý lak. Desky se tedy osvítlí, již bez jakéhokoliv motivu, a opět umyjí v roztoku NaOH. Nutností je také ošetření desek, tedy spíše jejich měděné vrstvy, proti vzdušné oxidaci. Měď při vystavení do vzdušného prostředí totiž velmi rychle oxiduje, i když to nemusí být okem viditelné. Problémy ale vznikají při následném pájení. Desky byly ošetřeny pájitelným lakem a zkontrolovány, zda leptání bylo úspěšná a na deskách nejsou chyby ve smyslu nechtěných nebo přerušených spojení.

Po vyvrtání otvorů odpovídajících průměrů, osazení a zapájení součástek je nutné desky plošných spojů opět zkontrolovat a ošetřit. Je vhodné umýt všechny zbytky po pájení, jako je kalafuna nebo pájitelný lak. Pájitelný lak by mohl sice zůstat a sloužit jako konečná ochrana měděné vrstvy, ale v tomto případě to není vhodné. Všechna elektronika bude totiž umístěna ve venkovním rozvaděči, kde budou mnohem horší klimatické podmínky než podmínky při umístění uvnitř temperované budovy. Desky byly tedy opatřeny ochranným plastickým nátěrem, který slouží jako elektrická izolace a zároveň izolace proti povětrnostním vlivům (především vzdušné vlhkosti).

#### 3.3.1 Oživení elektroniky

Nedílnou součástí realizace elektronického zapojení je finální úkon – oživení. Pod tímto pojmem si lze představit kontrolu správného osazení součástek, prvotní připojení napájení a otestování funkčnosti. Pokud je vše v pořádku, může se směle pokračovat v testování různých provozních stavů. Pokud ale některá část nebo dokonce celá elektronika nefunguje, je nutné chyby vyhledat a opravit.

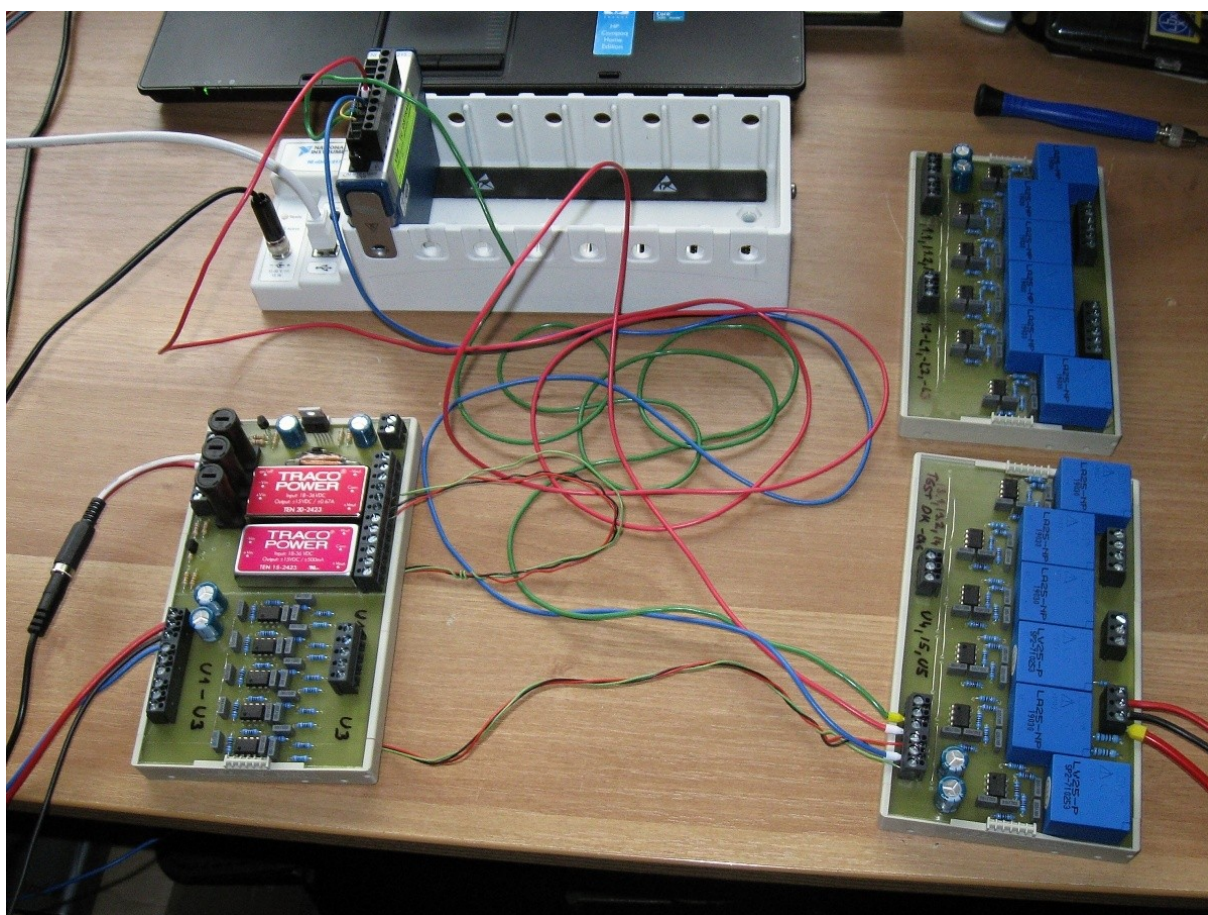
Nejdříve přišlo na řadu otestování elektroniky napájecích zdrojů. Koupené DC/DC měniče Traco by neměly skýtat žádná úskalí a fungovaly bez jakýchkoliv problémů. Stejně tak fungoval na první zapojení sestavovaný DC/DC měnič založený na integrovaném obvodu LM2575.

Dále bylo na řadě otestování všech převodníků a jejich filtrů. Zásadním úkonem je kontrola, zda není v některé napájecí větvi zkrat. Poté následuje postupné prověření každého kanálu. Nejdříve se otestuje nulové výstupní napětí při nezapojeném vstupu a poté se pomocí připojeného signálního generátoru a osciloskopu otestuje přenos signálu celým kanálem. Při testu byl použit signální generátor schopný dodat signál o hodnotách až  $\pm 30V$  a  $\pm 10A$  při frekvenci DC-20kHz. Jednalo se o výkonový audio zesilovač a odporovou zátěž. Signál generoval program vytvořený v LabVIEW a zvuková karta osobního počítače. Byl to tedy svépomocí postavený generátor s možností dodávat „vyšší“ výkony. Žádný podobný generátor nebyl v době ožívování dostupný, a proto bylo zvoleno toto řešení, které plně postačovalo k základnímu odzkoušení funkce všech kanálů měřicí elektroniky. Pro měření výstupního signálu byl použit jednak osciloskop, ale také NI compactDAQ šasi s přesnou měřicí

kartou. Pomocí této karty byla také změřena amplitudová frekvenční charakteristika AA filtrů, potažmo celých kanálů.

Veškerá měřicí elektronika také fungovala na první zapojení. Testování se provádělo dlouhodobě, kvůli ověření funkčnosti i po zahřátí. Testování neukázalo žádné negativní nebo nechtěné chování vyrobené elektroniky a prokázalo její plnou funkčnost.

Na závěr, jako již plně funkční, byly desky plošných spojů vloženy do modulových krabiček, které lze připevnit na DIN lištu. Celkem bylo použito tři stejně velkých krabiček, kdy malá DPS měřicí elektroniky a DPS s napájecími DC/DC zdroji byly vloženy do jedné společné krabičky (Obr. 15 vlevo dole).



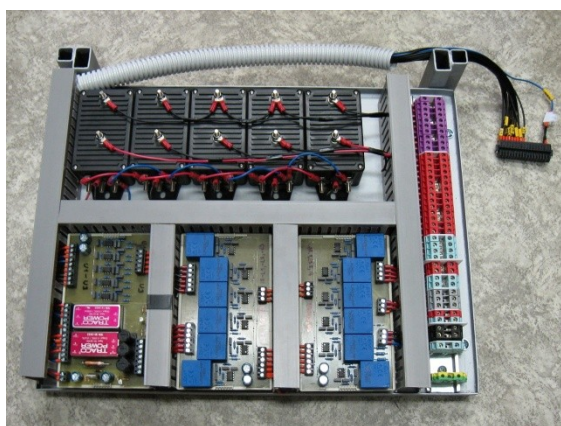
Obr. 15 Testování elektroniky za pomoci zařízení NI compactDAQ



### 3.3.2 Umístění a zapojení elektroniky na panely rozvaděče

Pro umístění veškeré elektroniky do rozvaděče byl vymyšlen systém s pohyblivým uložením. Pohyblivé v tom smyslu, aby bylo možné jednotlivé části monitorovacího systému vyndat ven z rozvaděče a provést případné úpravy. Elektronika má být umístěna na dvou v rozvaděči za sebou zavěšených panelech. Panely mají dostatečně malý rozměr, aby se daly vysunout ven skrze dvířka rozvaděče. Mechanické upevnění je ale mimo záběr této diplomové práce a nebude se zde více popisovat.

Rozměry jednotlivých komponent neumožňovaly mnoho různých variant rozmístění. Finální rozvržení bylo zvoleno následovně. Na předním panelu byla umístěna veškerá měřicí elektronika (převodníky a AA filtry) a příslušné měniče napětí, na zadním panelu ostatní komponenty (cRIO, WiFi zařízení, nabíječka a odpojovač baterie). Na každém panelu musí být také svorkovnice zajišťující propojení jednak mezi panely navzájem, ale také propojení k měřenému obvodu. Baterie nebylo možné kvůli rozměrům i hmotnosti umístit na panely, a proto jsou volně položeny pod panely v rozvaděči. Konečná podoba obou panelů po provedení veškerého propojení je na Obr. 16 a 17.



Obr. 16 Osazený a propojený přední panel



Obr. 17 Osazený a propojený zadní panel

## 3.4 Měření charakteristik a kalibrace elektroniky

Každá měřicí elektronika by byla bez vyhodnocení přesnosti měření pouze bezcenným seskupením součástek. Proto také měřicí elektronika monitorovacího systému byla proměřena v mnoha různých ohledech. Jednak byly změřeny amplitudové frekvenční charakteristiky a také vyhodnocena přesnost měření spojená s kalibrací do požadovaných mezí.

### 3.4.1 Frekvenční charakteristiky

Frekvenční charakteristiky se měřili s použitím přesného generátoru signálu a měřicího systému. Jako generátor signálu byl použit kalibrátor Fluke 6100A (Obr. 18). Jedná se téměř o dokonalé řešení pro testování jakékoliv elektroniky, protože kalibrátor dodává absolutně přesný signál. Jedinou nevýhodou



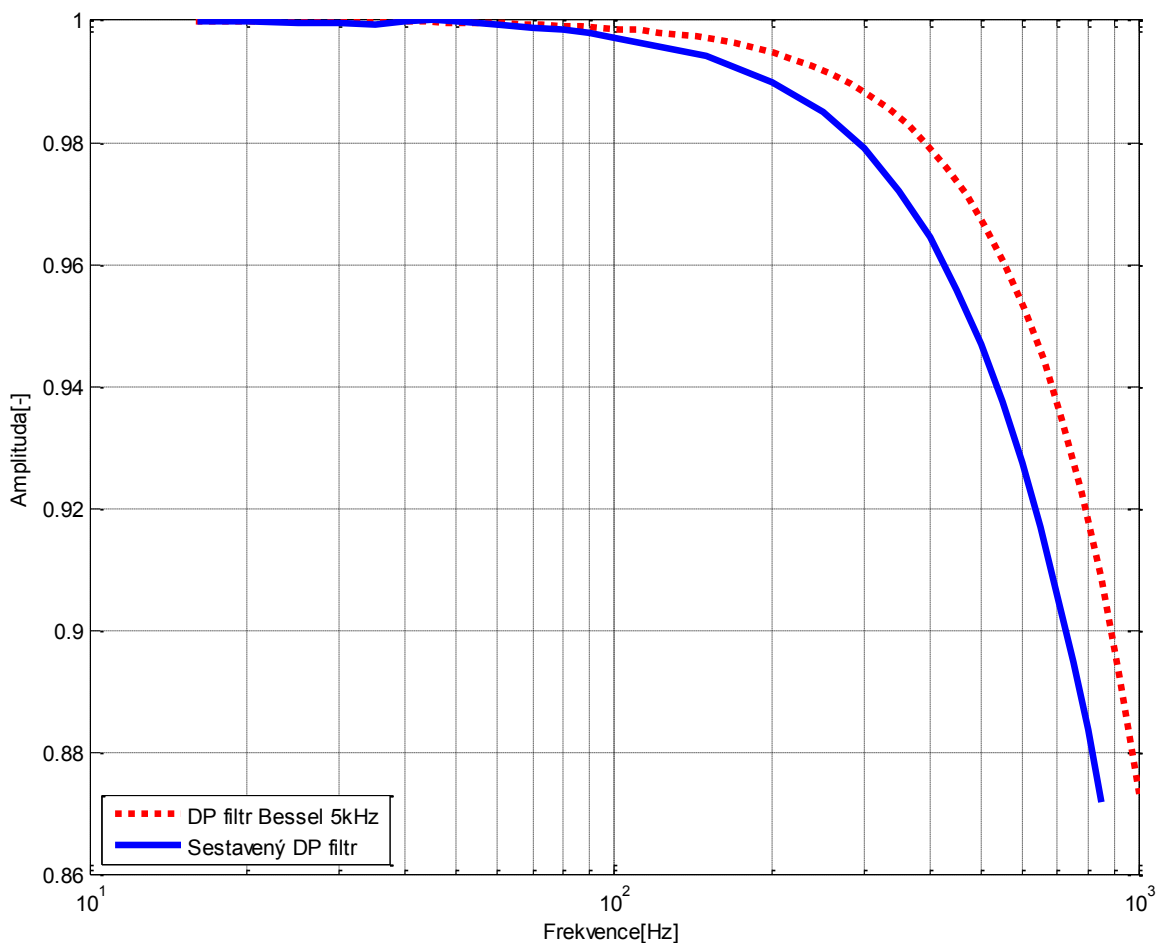
kalibrátoru je jeho frekvenční rozsah výstupních signálů. Kalibrátor je určen pro kalibraci signálů okolo síťové frekvence 50Hz. Maximální frekvence, kterou lze na kalibrátoru nastavit, je 850Hz. Sice lze do spektra výstupního signálu přidat i vyšší harmonické o frekvenci vyšší než 850Hz, ale o mnohem nižší amplitudě, což bylo následným měřením vyhodnoceno jako nepoužitelné pro toto testování. Testování měřicí elektroniky tedy probíhalo pouze na frekvencích do 850Hz. Pro měření signálů vystupujících z testované měřicí elektroniky byl použit systém NI compactDAQ s měřicí kartou NI9215 (Obr. 15). Tato karta je dostatečně rychlá i přesná, aby se pro tento účel dala použít.



**Obr. 18 Kalibrátor Fluke 6100A**

Samotné testování probíhalo tak, že na napěťové i proudové vstupy byl přiváděn různý signál. Jednak to byl stejnosměrný signál o různých amplitudách a také střídavý signál o různých amplitudách i frekvencích. Byly vyzkoušeny všechny možné kombinace odpovídající předpokládaným měřeným veličinám v konečné aplikaci monitorovacího systému.

Měřením bylo potvrzeno, že odpovídající si kanály mají téměř totožné charakteristiky. Všechny kanály mají také totožný přenos ve frekvenční oblasti, což je charakteristika, která se měla tímto měřením ověřit. Na Obr. 19 je uvedena amplitudová charakteristika jednoho z kanálů při současném porovnání s charakteristikou ideálního filtru. Charakteristiky se mírně liší, reálný sestavený filtr má nižší charakteristickou frekvenci, což se ale očekávalo již při návrhu filtru s nepřesnými hodnotami pasivních prvků filtru.



Obr. 19 Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika ideálního a reálného filtru

### 3.4.2 Přesnost měření a kalibrace

Dalším stupněm ověření správné funkčnosti bylo vyhodnocení přesnosti měření. Již v minulém kroku při měření frekvenčních charakteristik bylo kontrolováno, zda elektronika neposkytuje nesmyslné výstupní signály. Toto zběžné otestování plně dostačovalo, ale nyní je na řadě přesné vyhodnocení přesnosti měření. Navíc byl při tomto měření již použit systém cRIO s měřicím modulem, který je určen pro finální měřicí systém. Byl tedy otestován kompletní monitorovací systém.

V Tabulce 3 je vypočtená absolutní přesnost měřicího modulu NI9205 vzhledem k rozsahu měřené veličiny. Vztahy pro výpočet a potřebné údaje jsou uvedeny v příslušné technické literatuře [5]. Také je zde sepsána přesnost převodníků LEM vycházející z údajů v datových listech.

**Tabulka 3 Přesnost měřicího modulu a převodníků LEM**

<b>Měřený vstup</b>	<b>Max. měřená hodnota</b>	<b>Převodový poměr celkový</b>	<b>Absolutní přesnost modulu pro max. měřenou hodnotu</b>	<b>Dtto přepočítané na měřenou veličinu</b>	<b>Přesnost převodníku LEM</b>
I1.1	10A DC	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I1.2	10A DC	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I1.3	20A DC	3,75V / 25A	2,2mV	14,67mA	±0,125A
I2.L1	10A 0-50Hz	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I2.L2	10A 0-50Hz	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I2.L3	10A 0-50Hz	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I3.1	10A DC	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I3.2	10A DC	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I4	10A DC	3,75V / 12A	2,3mV	7,36mA	±0,06A
I5	0,5A AC	5V / 5A	1mV	1mA	±0,025A
U1	15V DC	7,5V / 50V	1,9mV	12,67mV	±0,35V
U2.L1	35V 0-50Hz	5V / 50V	2,5mV	25mV	±0,245V
U2.L2	35V 0-50Hz	5V / 50V	2,5mV	25mV	±0,245V
U2.L3	35V 0-50Hz	5V / 50V	2,5mV	25mV	±0,245V
U3	15V DC	7,5V / 50V	1,9mV	12,67mV	±0,35V
U4	15V DC	3,75V / 15V	2,6mV	10,4mV	±0,12V
U5	230V AC	3,75V / 246V	2,5mV	164mV	±1,17V

Samotné měření probíhalo v laboratorních podmínkách za konstantní pokojové teploty. Na kalibrátoru Fluke 6100A se nastavila požadovaná hodnota a pomocí programu ovládající cRIO se změřily výstupní signály. Na základě těchto dat lze vypočítat absolutní chybu měření [3]:

$$\Delta = X_M - X_S \quad [V; V, V] \quad (8)$$

Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro napět'ové kanály a jejich absolutní chyby měření

Us [V]		0	10	12	15	20	30	40	50	60	80	100	150	200	230
<b>Naměřené hodnoty - Um [V]</b>															
U1		0,18	10,1	12,1	15,1	20,1	30								
U2.L1		-0	9,95	11,9	14,9	19,9	29,9	39,8							
U2.L2		0,03	9,97	12	14,9	19,9	29,9	39,8							
U2.L3		0	9,98	12	15	20	30	39,9							
U3		0,01	9,96	11,9	14,9	19,9	29,8								
U4		0	10,1	12,1	15,1										
U5		-1,5	8,51	10,5	13,5	18,5	28,5	38,5	48,6	58,6	78,7	98,8	149	199	229
<b>Absolutní chyba měření - Δ [V]</b>															
U1		0,18	0,14	0,12	0,11	0,09	0,04								
U2.L1		-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2							
U2.L2		0,03	-0	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2							
U2.L3		0	-0	-0	-0	-0	-0,1	-0,1							
U3		0,01	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2								
U4		0	0,05	0,06	0,06										
U5		-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,4	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-0,8	-0,6

Z Tabulky 4 si lze povšimnout, že kanály nemají zcela konstantní charakteristiku zesílení a také mají drobný offset (stejnoseměrnou složku v užitečném signálu). Tyto neduhy jsou způsobené jednak odchylkou pasivních prvků v AA filtrech od přesné hodnoty a také chybou převodníků LEM. Převodníky způsobují offset a pasivní prvky stoupající nebo klesající charakteristiku. Předpokládá se, že tyto trendy se nebudou výrazně měnit s časem ani se změnou teploty, protože jsou způsobeny výrobními vadami (odchylkami v předepsaných mezích), a proto je lze kompenzovat. Kompenzace byla provedena nastavením souvisejících konstant v měřicím programu systému cRIO.

Chyba elektroniky byla vykompenzována na nulovou absolutní odchylku (s přesností na desetinu procenta maximálního měřicího rozsahu). Tabulka hodnot naměřených po kompenzaci zde již uvedena nebude, protože by zbytečně zabírala místo. Prvotní měření i kompenzace probíhaly na základě stejnosměrných hodnot a přesnost kanálů pro měření střídavých kanálů byla poté potvrzena i na střídavých signálech. Absolutní chyba měření zůstala nezměněna (s přesností na desetinu procenta maximálního měřicího rozsahu).

Pro proudové měřicí kanály probíhalo měření i kompenzace stejným způsobem. Hodnoty před kompenzací jsou uvedeny v Tabulce 5.

**Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro proudové kanály a jejich absolutní chyby měření**

$I_s$ [A]		0	0,25	0,5	1	2	4	5	6	8	10
<b>Naměřená hodnota - <math>I_m</math> [A]</b>											
I1.1		-0,063	0,178	0,417	0,895	1,852	3,765	4,723	5,679	7,594	9,508
I1.2		-0,054	0,185	0,425	0,903	1,861	3,775	4,732	5,689	7,603	9,518
I1.3		-0,138	0,111	0,36	0,857	1,855	3,849	4,845	5,84	7,833	9,822
I2.L1		-0,061	0,178	0,417	0,894	1,851	3,763	4,719	5,675	7,587	9,499
I2.L2		-0,058	0,181	0,421	0,9	1,86	3,778	4,737	5,696	7,612	9,529
I2.L3		-0,059	0,18	0,419	0,898	1,856	3,771	4,73	5,689	7,607	9,525
I3.1		-0,082	0,158	0,398	0,878	1,839	3,76	4,721	5,681	7,602	9,523
I3.2		-0,049	0,196	0,436	0,914	1,874	3,789	4,746	5,704	7,617	9,532
I4		-0,065	0,174	0,413	0,891	1,848	3,761	4,717	5,674	7,587	9,5
I5		-0,022	0,227	0,476	0,974	1,972	3,968				
<b>Odchylka měření - <math>\Delta</math> [A]</b>											
I1.1		-0,063	-0,072	-0,083	-0,105	-0,148	-0,235	-0,277	-0,321	-0,406	-0,492
I1.2		-0,054	-0,065	-0,075	-0,097	-0,139	-0,225	-0,268	-0,311	-0,397	-0,482
I1.3		-0,138	-0,139	-0,14	-0,143	-0,145	-0,151	-0,155	-0,16	-0,167	-0,178
I2.L1		-0,061	-0,072	-0,083	-0,106	-0,149	-0,237	-0,281	-0,325	-0,413	-0,501
I2.L2		-0,058	-0,069	-0,079	-0,1	-0,14	-0,222	-0,263	-0,304	-0,388	-0,471
I2.L3		-0,059	-0,07	-0,081	-0,102	-0,144	-0,229	-0,27	-0,311	-0,393	-0,475
I3.1		-0,082	-0,092	-0,102	-0,122	-0,161	-0,24	-0,279	-0,319	-0,398	-0,477
I3.2		-0,049	-0,054	-0,064	-0,086	-0,126	-0,211	-0,254	-0,296	-0,383	-0,468
I4		-0,065	-0,076	-0,087	-0,109	-0,152	-0,239	-0,283	-0,326	-0,413	-0,5
I5		-0,022	-0,023	-0,024	-0,026	-0,028	-0,032				

Na závěr pro ověření výsledků kalibrace byla vyhodnocena přesnost při měření výkonu. Pro test byly vybrány kanály U2-L1 a I2-L1. Na kalibrátoru byl nastaven sinusový signál o parametrech:

$U=20V$ ,  $I=5A$ ,  $S=100VA$ ,  $P=100W$ ,  $THD=0$

**Tabulka 6 Měření výkonu s již nakalibrovaným monitorovacím systémem**

$X_M$ při $f$ [Hz]=		16	20	30	40	50	60	80	100	140	150	250	500
S [VA]		99,5	99,4	99,4	99,4	99,4	99,4	99,3	99,3	99,2	99,2	99	98
P [W]		99,4	99,4	99,4	99,4	99,4	99,4	99,3	99,3	99,2	99,2	98,9	97,7

V Tabulce 6 jsou viditelné drobné odchylky, ale tyto jsou naprosto v pořádku, protože jsou hluboko pod hodnotou 1%. Pro měřicí rozsah kanálu 600VA (50V a 12A) je při frekvenci 50Hz absolutní odchylka z rozsahu přesně 0,1%. Tedy vynikající hodnota.

## 4 Programová část monitorovacího systému

Nedílnou součástí monitorovacího systému je jeho programové vybavení. Hardware se musí správně naprogramovat, aby plnil požadované funkce. V tomto případě bylo nutné vytvořit více oddělených, ale spolupracujících programů. Zprv bylo nutné vytvořit program pro systém cRIO obsluhující měření a ukládání dat a také program pro vzdálený počítač zajišťující archivaci a vizualizaci dat.

Pro vývoj veškerých programů bylo použito vývojového prostředí NI LabVIEW, konkrétně verze 2010 s nainstalovanými doplňky, které jsou potřebné pro tvorbu programů na systém cRIO. Jedná se o LabVIEW RealTime Module a LabVIEW FPGA Module. LabVIEW je také vhodné pro vytvoření vizualizace na vzdáleném PC. Není tedy důvod používat další vývojový nástroj.

Pro efektivní vývoj aplikací na systému cRIO je vhodné znát odlišnosti této platformy od konvenčních programů spouštěných na platformě PC. Hlavní rozdíl je v použití obvodu FPGA, který poskytuje při správné technice programování mnohonásobně vyšší výkon oproti PC. Ovšem kvůli velmi specifické architektuře neumí FPGA provádět libovolné operace (např. aritmetiku s plovoucí řádovou čárkou) a z toho důvodu je doplněno o kontrolér s operačním systémem reálného času. Ten zajišťuje ukládání a odesílání dat, přičemž FPGA ovládá měření a matematicky upravuje naměřená data.

V celém monitorovacím systému je nasazeno několik programů, které si předávají data. Jednak se data přenáší z obvodu FPGA do cRIO kontroléru, pak v rámci samotného programu kontroléru, mezi kontrolérem a vzdáleným počítačem a také v rámci programů běžících na vzdáleném počítači. Všechny tyto datové přenosy využívají techniku synchronizace a předávání dat producent-konzument a FIFO vyrovnávacích pamětí.

### 4.1 Měření a ukládání dat na systému cRIO

Měření i prvotní ukládání dat se provádí na systému cRIO. Jeden měřicí modul (modul s analogovými vstupy) měří všechny sledované veličiny. Modul je fyzicky přímo propojen s obvodem FPGA, který provádí číselnou úpravu získaných hodnot i jejich předávání k dalšímu zpracování. FPGA dokáže provádět výpočetní operace velmi efektivně, rychle a také deterministicky. Toto dovoluje dosáhnout vysoké vzorkovací frekvence měření, ale i celkově vysoké spolehlivosti měřicího řetězce. Sběr dat je totiž z časového hlediska nejnáročnější operace, není zde přípustný žádný výpadek. FPGA provádí tuto operaci mnohem rychleji, než by to dokázal jakýkoliv jiný sekvenčně pracující obvod (např. mikroprocesor). Data se ukládají do vyrovnávací FIFO paměti, odkud si je čte cRIO kontrolér.

Kontrolér slouží k zajištění přenosu dat na vzdálený počítač. Vyčte data z vyrovnávací paměti obvodu FPGA a připraví je pro odeslání do PC. Data se musí uložit do nějakého standardizovaného formátu, aby bylo další zpracování jednodušší. Jako vhodný formát uložení dat byl zvolen formát CSV. Kontrolér tedy načte data z FPGA, uloží je do formátu CSV a počká na přenesení do vzdáleného počítače. V případě výpadku spojení nebo poruchy vzdáleného počítače se data budou ukládat do lokální paměti kontroléru a dále se přenesou až po obnovení spojení.

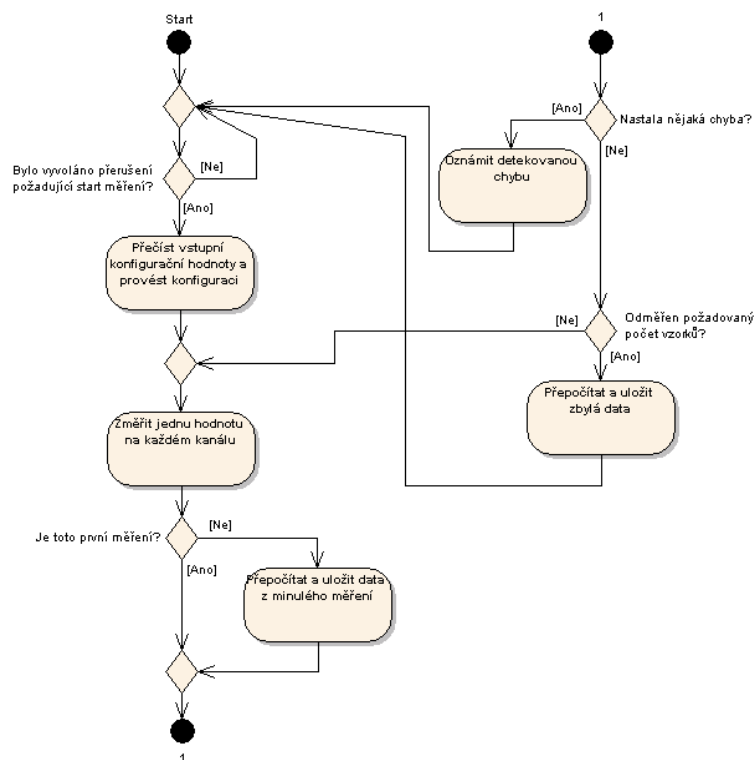
Kontrolér také řídí chod měření, zapíná napájení měřicích převodníků i WiFi zařízení. Toto provádí přes modul digitálních výstupů. Řízení spotřeby měřicí části je důležité, kvůli omezeným zásobám energie v baterii monitorovacího systému.

#### **4.1.1 Program pro FPGA obvod**

FPGA obvod je první část měřicího řetězce, který přijde do styku s digitalizovanými daty. FPGA přímo komunikuje s měřicím modulem a ovládá jej. Úkolem FPGA je předat data z měřicího modulu do vyrovnávací paměti s takovou rychlostí, aby nedocházelo k výpadkům, protože moduly pro cRIO nemívají nikdy integrovanou vyrovnávací paměť. Toto je odlišnost od klasických měřicích karet do PCI slotu nebo USB rozhraní. Dále také FPGA provádí matematický přepočít naměřené hodnoty na správnou hodnotu vzhledem k převodní konstantě celého měřicího řetězce. Pokud tedy modul NI9205 vzorkuje s maximální vzorkovací rychlostí 250kS/s, musí FPGA provádět zápis dat do mezipaměti i matematický přepočít s rychlostí minimálně 250kHz.

Program pro FPGA musí obsahovat funkcionalitu pro synchronizaci s kontrolérem, aby FPGA obvod neprováděl ukládání dat do mezipaměti v době, kdy je kontrolér není schopen přijmout. Toto je zajištěno přes přerušení, které vyvolává kontrolér v době připravenosti. V programu jsou také implementovány ochranné funkce, například pro kontrolu správného nastavení proměnných programu nebo dodržení správné rychlosti vzorkování.

Program funguje následovně. Po spuštění čeká na přerušení vyvolané od kontroléru. Po jeho vyvolání začíná celý proces sběru dat. Přečtou se vstupní konfigurační proměnné a podle nich se nastaví časovač (rychlost sběru dat), počet vzorků, které se mají vyčíst, a konstanty pro matematickou úpravu změřených hodnot odpovídající převodním konstantám měřicí elektroniky. Měření a zápis dat do vyrovnávací paměti probíhá podle nastavené rychlosti časovače a po dobu, než se odměří požadovaný počet vzorků. Během tohoto měření se kontroluje, zda nedošlo k přetečení vyrovnávací paměti nebo zda se měření neopozdilo vůči požadované vzorkovací frekvenci. Po naměření všech vzorků se měření ukončí a program se vrátí do výchozího stavu, kdy čeká na další přerušení od kontroléru. Tento koloběh se opakuje do nekonečna – program je spuštěn v nekonečné smyčce. Program lze ukončit pouze restartováním zařízení. Toto ovšem není nedokonalost programu, je to běžný způsob programování takovýchto zařízení. Program na FPGA nepostupuje sekvenčně, nýbrž se celý kód vykonává současně v jednom hodinovém taktu (pokud to je možné, jinak ve více taktech), a nehrozí zaseknutí programu na nějaké neošetřené programové chybě, protože se pokaždé jakoby sám obnoví. Program se tedy nemusí jakkoliv restartovat nebo ukončovat a může zůstat spuštěn neustále. Program také informuje o svém stavu pomocí LED diody na čelním panelu systému cRIO a lze jednoduše poznat, v jakém je zrovna stavu.



**Obr. 20 Activity diagram programu pro FPGA**

Přestože FPGA obvod nepracuje sekvenčně, jeho program se musí jakoby sekvenčně naprogramovat. Na Obr. 20 si lze prohlédnout aktivní diagram fungování programu. Program již byl popsán výše, ale v diagramu je zakreslena jedna významná maličkost. Jedná se o to, že v jednom cyklu se odměří data, ale až v cyklu dalším se uloží do paměti. Toto je důležité dodržet kvůli samotnému principu fungování FPGA obvodů.

Vytvořený program se musí nejdříve zkompileovat a teprve potom je možné jej spustit. Kompilace se provádí pomocí externího kompilátoru výrobce FPGA obvodů, firmy Xilinx, a trvá poměrně mnoho času. Kompilace programu pro monitorovací systém zabrala téměř 40 minut. Po úspěšném dokončení kompilace je vytvořen bitový obraz programu (tzv. bitfile), který se nahraje do FPGA. Tímto by byl program hotov a je nutné vytvořit nadřazenou řídicí aplikaci pro cRIO kontrolér.



#### 4.1.2 Program pro cRIO kontrolér

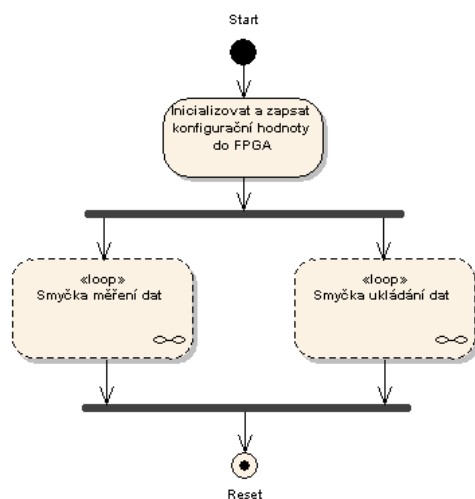
Program kontroléru má za úkol řídit všechny komponenty monitorovacího systému. Určuje FPGA obvodu, kdy má měřit data, přebírá data z vyrovnávací paměti, počítá efektivní hodnoty všech napětí a proudů, také počítá jednotlivé výkony a všechna data nakonec ukládá do souboru. Pomocí síťových proměnných komunikuje s programem na vzdáleném PC a informuje ho o přítomnosti nových dat.

Na cRIO kontroléru je nainstalovaný operační systém reálného času a tomu se také podřizuje styl programu. Jednotlivé funkce se vykonávají cyklicky ve smyčkách (=vláknech) s nastavenou prioritou a časováním. Program pro monitorovací systém má konkrétně dvě hlavní smyčky. Ta první řídí měření dat a ta druhá ukládání již naměřených dat. První smyčka má vyšší prioritu, protože sběr dat je nutné provádět v přesných časových intervalech. Přenos dat mezi první a druhou smyčkou se vykonává pomocí metody producent-konzument a vyrovnávací paměti, podobně jako přenos dat mezi obvodem FPGA a cRIO kontrolérem.

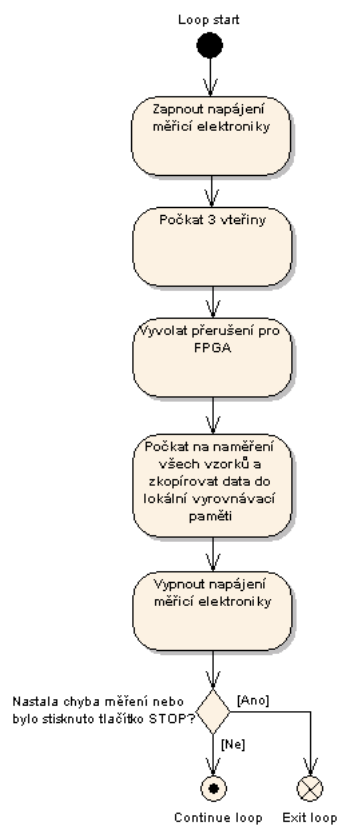
Po spuštění programu se provede základní konfigurace všech ovládaných komponent. Tím je myšleno nastavení a inicializace vyrovnávací FIFO paměti pro přenos FPGA-kontrolér a také předání konstant o jednotlivých měřených kanálech, převodních poměrech elektroniky a parametrech měření do programu FPGA. Po této konfiguraci přechází program do obou programových smyček. V té první, která zabezpečuje měření dat, se děje následující. Nejdříve se zapne napájení měřicí elektroniky, chvíli se počká na ustálení (pauza 3 vteřiny) a vyvolá se přerušení pro FPGA. Tímto program v FPGA odstartuje měření a ukládá data do vyrovnávací paměti. Po odměření požadovaného počtu vzorků se měření ukončí, data se uloží do lokální vyrovnávací paměti a vypne se napájení měřicí elektroniky. Tím je první smyčka na konci a vrací se na svůj začátek. Běh smyčky se znovu spustí po uplynutí periody jedné minuty, což je čas nastavený v programu a požadovaný podle zadání pro periodu měření.

Druhá programová smyčka má nastavenou nižší prioritu, protože povaha její práce nevyžaduje přesný determinismus. Zde se sbírají naměřená data poslaná přes vyrovnávací paměť z první smyčky a dále se zpracovávají. Vypočítají se efektivní hodnoty jednotlivých kanálů a jejich výkony. Hodnoty se s aktuální časovou značkou uloží do CSV souboru na lokální disk systému cRIO. Současně se nastaví síťová proměnná, která signalizuje vzdálenému počítači přítomnost nových dat. Pokud se od posledního uložení dat změnil den, vytvoří se nový soubor s aktuálním datem a starý se přesune do složky s dokončenými soubory. Tím všechna práce této smyčky končí a dále jen čeká na nové měření a nová data.

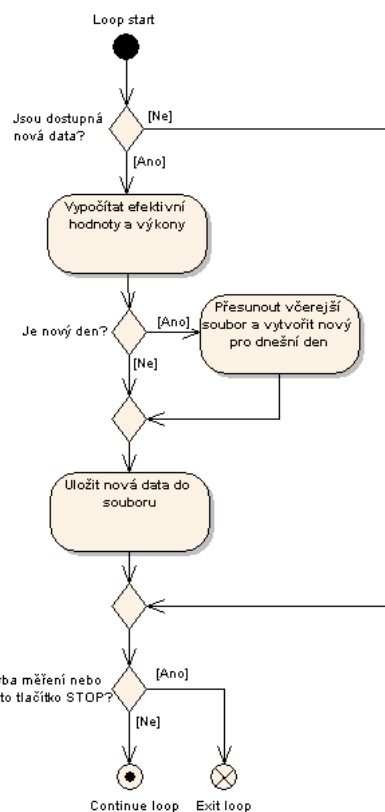
Pokud dojde během měření k nějaké chybě, program se ukončí. Zavřou se všechny otevřené reference a cRIO se restartuje. Takto je zajištěna kontinuita měření, pokud dojde k nějaké chybě při vykonávání programu. Nemělo by se tedy stát, že se program zasekne na jednom místě a nebude nic dalšího dělat. Toto je velmi důležité pro autonomnost celého systému. Není přípustné ani možné, aby někdo neustále systém dozoroval a v případě potřeby manuálně provedl reset.



Obr. 21 Activity diagram programu pro cRIO kontrolér



Obr. 22 Activity diagram měřicí smyčky



Obr. 23 Activity diagram smyčky pro ukládání dat

## 4.2 Zálohování a vizualizace dat na vzdáleném počítači

Vzdálený počítač má za úkol získávat data ze systému cRIO, zálohovat je na svém pevném disku a také je zobrazovat na internetové stránce. Tyto funkce obstarává několik programů.

První program získává data ze systému cRIO. Pomocí síťové proměnné dá cRIO tomuto programu pokyn, že byla změřena nová data. Program se připojí přes FTP protokol na místní disk v cRIO a zkopíruje datový soubor. Toto je použití metody písař-čtenář, protože cRIO mimojiné dává programu také informace, zda není soubor právě používán. O metodu producent-konzument se jedná v případě, kdy program přesouvá soubor se starými daty z paměti v cRIO do lokální paměti počítače. Staré soubory již nezůstávají na cRIO disku, protože s nimi již cRIO nebude nikdy pracovat. Naproti tomu musí dnešní soubor zůstat, protože cRIO do něj bude ještě zapisovat další data.

Na počítači je ještě spuštěn druhý program, který má na starosti internetovou vizualizaci. Není potřeba žádný další vývojový program, protože prostředí LabVIEW dokáže z jakéhokoli programu vytvořit webovou stránku a spustit ji na vlastním webovém serveru. Kdokoliv se může na server připojit a shlédnout běh programu, v našem případě vizualizaci naměřených dat. Prohlízející uživatelé dokonce nemusí mít na svém počítači nainstalovaný celý balík LabVIEW, postačuje pouze malý LabVIEW Run-Time, který je zdarma dostupný na webu společnosti NI.

Obsah webové vizualizace je prostý, jsou zde zobrazeny pouze výkonové parametry měřeného systému, žádné složité animace. Vizualizace přispívá svou jednoduchostí k bezproblémovému spuštění na jakémkoliv počítači, protože není nutné přenášet velké množství dat. Pohled na spuštěnou vizualizaci je na Obr. 24.

Naměřená data neboli CSV soubory s naměřenými daty je možné si také stáhnout z tohoto počítače pomocí FTP přístupu. Soubory lze jednoduše otevřít v jakémkoliv textovém prohlížeči nebo tabulkovém procesoru. Nejedná se totiž o žádné binárně zakódované datové soubory, ale o normální soubory s prostým textem.



Obr. 24 Webová vizualizace provozních stavů hybridního napájecího systému

## 5 Hodnocení funkčnosti monitorovacího systému

Monitorovací systém byl již nasazen na místo určení a probíhá na něm testovací provoz. Nabízí se otázka, jak vlastně celý systém funguje a jak splňuje zadané požadavky.

Zásadní pro bezchybný provoz monitorovacího systému je jeho nepřerušované napájení. Napájecí zdroj pro systém cRIO a měřicí elektroniku je tvořen olověnou baterií, která se v noci nabíjí ze sítě veřejného osvětlení. Během testovacího provozu se ukázalo, že baterie je dostatečně dimenzovaná i na několikadenní provoz bez nabíjení. Ze začátku totiž nedocházelo ke správnému nabíjení a tak musela baterie napájet své spotřebiče po několik dní. Problém byl v použitém jističi veřejného osvětlení a nabíječi. Startovací proud nabíječe byl na 6A jistič příliš vysoký a docházelo k jeho vybavování. Vše se vyřešilo výměnou za 10A jistič. Od té doby již nabíjení funguje spolehlivě.

Další důležitou a nepostradatelnou částí monitorovacího systému je komunikace mezi systémem cRIO a vzdáleným počítačem. Zde se také vyskytly problémy. V rozvaděči byl umístěn WiFi router zajišťující bezdrátové datové propojení. Router funguje tak, že se připojí do sítě poskytovatele a zprostředkovává připojeným zařízením přístup do sítě poskytovatele. Přitom dochází k překládání IP adres a síťové adresy před a za routerem nejsou stejné (= zařízení před a za routerem jsou na různých sítích). Toto překládání adres způsobovalo nemalé problémy při komunikaci se systémem cRIO. Jediným řešením bylo vyměnit WiFi router za jiné zařízení, které by problém odstranilo. Výměnou se problém odstranil a komunikace fungovala bezvadně. Ale to nebyl jediný problém s WiFi připojením. WiFi zařízení je umístěno v rozvaděči a ten poměrně výrazně tlumí přijímaný signál. Navíc nebyl na rozvaděč nasměrován žádný přístupový bod a signál se přijímal z některé z okolních budov. Bylo tedy nutné nainstalovat nový přístupový bod, který by měl anténu nasměrovanou na rozvaděč. Tímto se odstranil další problém bránící komunikaci s monitorovacím systémem.

Vytvořený měřicí program fungoval téměř bez problémů. Bylo nutné provést pouze malé úpravy ve způsobu zachycování a ošetřování chyb, aby program nezůstával nečinně stát po výskytu chyby FPGA obvodu. Program tedy měřil a ukládal data přesně podle prvotního návrhu. Data se správně přenášejí na vzdálený počítač, kde je také spuštěna jejich vizualizace. Programy fungují bez zádrhelu celé dny a programová část monitorovacího systému je tedy plně funkční.

Ovšem monitorovací systém by byl k ničemu bez funkční měřicí elektroniky. Zde se ale také nic zásadního nestalo. Elektronika byla dokonale odzkoušena v laboratoři a po nasazení do rozvaděče fungovala na první zapojení. Jediné negativum, které se projevilo, byl vliv teploty na přesnost měřicí elektroniky. S výkyvy teplot lze pozorovat drobnou odchylku měřených hodnot, která ale je minimální a hluboko pod hranicí očekávané přesnosti. S tímto jevem se při návrhu počítalo a nelze se mu vyhnout, protože každá elektronická součástka má nějakou teplotní závislost.

Kompletní monitorovací již funguje jako celek podle úmyslů, ke kterým je určen.

## 5.1 Naměřené výsledky

Výstupem monitorovacího systému jsou naměřená data. Data se ukládají s periodou jedné minuty do souboru formátu CSV. Tento soubor lze jednoduše analyzovat v jakémkoliv textovém či tabulkovém editoru.

V tabulce 7 je ukázka naměřených hodnot. Pro úsporu místa je zobrazena pouze každá desátá hodnota. Jedná se o data naměřená za slunečného dne, kdy fotovoltaické panely dodávají energii do baterie. Analýzou dat lze zjistit, jak probíhá nabíjení baterií. Z průběhu napětí na baterii U1 je patrné, že vrchol nabíjení je na hodnotě 14,5V (v čase 11:50), kdy je baterie nabitá a dále dochází k pozvolnému poklesu nabíjecího proudu I1.3 až do jeho úplného odpojení. Hodnoty I1.3 jsou záporné, protože proud je definován ve směru z baterie do regulátoru a během dne (nabíjení baterie) teče proud opačným směrem z regulátoru do baterie. Napětí na fotovoltaických panelech U3 a proudy panelů I3.1 a I3.2 také za vrcholem nabíjení stoupá, resp. proudy klesají, což přesně odpovídá napětí U1 a proudu I1.3. Před vrcholem nabíjení, kdy probíhá nabíjení plným proudem z FV panelů, je patrný rozdíl napětí U3 a U1, který je způsobený úbytkem napětí na výkonovém spínacím prvku regulátoru. Mezi součtem proudů tekoucích z panelů do regulátoru I3.1 a I3.2 a proudem tekoucího z regulátoru do baterie I1.3 je také nepatrný rozdíl způsobený spotřebou regulátoru.

Tabulka 7 Ukázka naměřených hodnot

Datum a čas	U1	I1.1	I1.2	I1.3	U2-L1	I2-L1	U2-L2	I2-L2	U2-L3	I2-L3	U3	I3.1	I3.2	U4	I4	U5	I5
2011_04_30_10_00	13,9	0	0	-8,8	0	0	0	0	0	0	14,4	4,6	4,3	0	0	0	0
2011_04_30_10_10	14	0	0	-9,1	0	0	0	0	0	0	14,5	4,8	4,5	0	0	0	0
2011_04_30_10_20	14	0	0	-9,6	0	0	0	0	0	0	14,6	5,1	4,7	0	0	0	0
2011_04_30_10_30	14,1	0	0	-10	0	0	0	0	0	0	14,7	5,3	4,8	0	0	0	0
2011_04_30_10_40	14,1	0	0	-10,2	0	0	0	0	0	0	14,7	5,4	4,9	0	0	0	0
2011_04_30_10_50	14,2	0	0	-10,4	0	0	0	0	0	0	14,8	5,5	5	0	0	0	0
2011_04_30_11_00	14,2	0	0	-10,6	0	0	0	0	0	0	14,9	5,7	5,1	0	0	0	0
2011_04_30_11_10	14,3	0	0	-10,8	0	0	0	0	0	0	14,9	5,8	5,1	0	0	0	0
2011_04_30_11_20	14,3	0	0	-10,9	0	0	0	0	0	0	15	5,9	5,2	0	0	0	0
2011_04_30_11_30	14,4	0	0	-11	0	0	0	0	0	0	15	5,9	5,2	0	0	0	0
2011_04_30_11_40	14,4	0	0	-11,3	0	0	0	0	0	0	15,1	6,1	5,3	0	0	0	0
2011_04_30_11_50	14,5	0	0	-10,9	0	0	0	0	0	0	15,4	5,9	5,1	0	0	0	0
2011_04_30_12_00	14,4	0	0	-9,4	0	0	0	0	0	0	16,2	5,1	4,4	0	0	0	0
2011_04_30_12_10	14,3	0	0	-7,6	0	0	0	0	0	0	17,1	4,2	3,6	0	0	0	0
2011_04_30_12_20	14,3	0	0	-6,9	0	0	0	0	0	0	17,5	3,8	3,2	0	0	0	0
2011_04_30_12_30	14,3	0	0	-5,9	0	0	0	0	0	0	18	3,3	2,7	0	0	0	0
2011_04_30_12_40	14,2	0	0	-5,4	0	0	0	0	0	0	18,1	3	2,5	0	0	0	0
2011_04_30_12_50	14,2	0	0	-4,2	0	0	0	0	0	0	18,7	2,4	1,9	0	0	0	0
2011_04_30_13_00	14,1	0	0	-3,7	0	0	0	0	0	0	18,9	2,1	1,7	0	0	0	0
2011_04_30_13_10	13,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,6	0	0	0	0	0	0
2011_04_30_13_20	13,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,6	0	0	0	0	0	0

## 6 Závěr

Obsahem této diplomové práce byl celkový návrh a vývoj monitorovacího systému sloužícího ke sledování toků výkonů v systému hybridního napájení. Lze si pod tím představit celý životní cyklus projektu počínaje sběrem a analýzou požadavků, teoretickým rozbořem problematiky, návrhem systémových celků až po samotnou realizaci a nasazení systému do provozu. Zvládnutí celého tohoto postupu vedlo ke zdárnému dokončení monitorovacího systému. V dnešní době je již systém nasazen v provozu a plní svou zamýšlenou funkci.

Nejvíce času a úsilí zabral návrh, vývoj a realizace měřicí elektroniky. Bylo nutné navrhnout obvodová schémata, vyrobit desky plošných spojů, zapojit a otestovat funkci elektroniky. Současně s tím bylo nutné vyvinout obslužné programy jak pro měřicí systém NI compactRIO, tak pro vzdálený počítač sloužící jako webový server a archivační úložiště naměřených dat.

Zvolená platforma měřicího systému NI compactRIO se zdá být velmi vhodnou pro nasazení v tomto i podobných měřicích zařízeních. Hlavní předností jsou jeho užité vlastnosti, jako je například vysoký výkon při zachování malých rozměrů a nízké spotřeby energie. Také vývoj aplikací je díky použitému vývojovému prostředí LabVIEW velmi jednoduchý a rychlý a tím také celkově velmi efektivní.

V současnosti je monitorovací systém funkční a plní úlohu sledování výkonů v systému hybridního napájení. Do budoucna již nejsou potřebné žádné další úpravy. Systém byl ovšem navržen s určitými rezervami ve svých možnostech. Například je možné pouhou úpravou měřicího programu sledovat výskyt vyšších harmonických složek v signálech v měřeném obvodu. Elektronika je na toto plně připravena, takže případné úpravy by spočívaly pouze v přepracování programu.

Vypracováním této diplomové práce jsem získal nové a také obohatil své dosavadní zkušenosti s komplexním zpracováním a životním cyklem reálného projektu. Nabyté zkušenosti mi jistě budou přínosem v mém budoucím profesním životě.

## 7 Použitá literatura

- [1] *CSV – Wikipedie* [online]. 2011, poslední revize 31.1.2011 [cit. 2011-04-28].  
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/CSV>>
- [2] MIŠÁK, S. – PROKOP, L. Posouzení účinnosti hybridních napájecích systémů. *Elektrorevue*. 2010, č. 122, s. 1-4. ISSN: 1213-1539.
- [3] BIČOVKÁ, Blanka. *Elektrická měření:teorie:Texty pro všechny formy studia*. Ostrava, 2004. 57 s. Skripta pro předmět Elektrická měření vyučovaného na Katedře měření Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava.
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 496 s. ISBN 80-7300-059-8
- [5] *NI 9205 Operating Instructions and Specifications* [online]. c2008, poslední revize únor 2008 [cit. 2011-05-03].  
<<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/075737D1A40189A8862573D0006C6146>>